

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

大規模災害および気候変動に伴う利水障害に対応した
環境調和型水道システムの構築に関する研究

平成29年度 総括・分担研究報告書

研究代表者 秋葉 道宏

平成30（2018）年 3月

目 次

研究班の構成-----	1
I. 総括研究報告	
大規模災害および気候変動に伴う利水障害に対応した 環境調和型水道システムの構築に関する研究 秋葉道宏	5
II. 分担研究報告	
1. ろ過漏出障害を回避するための浄水処理プロセスの開発-----	11
秋葉 道宏, 西村修	
2. 大規模災害および気候変動の水道原水水質への影響と対応策-----	31
柳橋泰生	
3. ろ過漏出障害原因微生物の同定技術の開発と存在実態調査-----	51
秋葉道宏, 藤本尚志, 藤瀬大輝	
4. 高分解能質量分析計を用いた臭気原因物質の探索-----	59
秋葉道宏, 高梨啓和, 下ヶ橋雅樹, 小倉明生, 北村壽朗	
5. カビ臭発生予測手法の構築-----	67
秋葉 道宏, 清水 和哉	
6. 大規模災害および気候変動に適応した活性炭処理システムに関する検討--	79
秋葉 道宏, 下ヶ橋雅樹, 越後信哉, 高梨啓和, 安井大貴	
7. 平成28年台風10号による水道施設被害調査-----	95
秋葉 道宏, 下ヶ橋雅樹, 三浦尚之, 西村修, 佐野大輔	
8. 次世代シーケンサーによるろ過漏出障害原因微生物の給配水系での挙動-	103
秋葉道宏, 藤本尚志, 藤瀬 大輝	
9. 大規模災害における感染症リスクとその管理-----	111
秋葉道宏, 三浦尚之, 下ヶ橋雅樹	
III. 研究成果の刊行に関する一覧表	117

研 究 班 の 構 成

(平成29年度)

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

東北大学大学院工学研究科教授 西 村 修
福岡大学大学院工学研究科教授 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上席主任研究官 下ヶ橋 雅 樹
筑波大学生命環境系准教授 清 水 和 哉

研究協力者

公益社団法人日本水道協会工務部次長 北 澤 弘 美
神奈川県企業庁水道水質センター所長 北 村 壽 朗
東北大学大学院工学研究科准教授 佐 野 大 輔
京都市上下水道局水質管理センター水質第1課担当課長補佐 小 倉 明 生
東京都水道局水質センター検査課課長代理 (生物検査担当) 江 原 和 宏
仙台市水道局浄水部水質管理課主任 伊 藤 雅 木
大分市水道局管理部浄水課水質管理室主査 高 橋 威 一 郎
神戸市水道局事業部水質試験所担当係長 清 水 武 俊
千葉県水道局技術部浄水課水質管理班担当係長 米 村 真 吾
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
横浜市水道局水質課水質管理係技術職員 平 健 司
独立行政法人水資源機構総合技術センターマネージャー 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 越 後 信 哉
国立保健医療科学院生活環境研究部主任研究官 三 浦 尚 之
国立保健医療科学院研究生 安 井 大 貴

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

大規模災害および気候変動に伴う利水障害
に対応した環境調和型水道システムの構築
に関する研究

平成29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30(2017)年 3月

大規模災害および気候変動に伴う利水障害に対応した
環境調和型水道システムの構築に関する研究

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 統括研究官

研究要旨

本研究では「大規模災害や気候変動に伴う利水障害に対応した環境調和型水道システム」の提案を目指し、流域システムの水管理対策、気候変動に伴う生物障害対策、ならびに水道システムの環境調和と持続可能性の評価に関連する研究を実施した。

ピコ植物プランクトン懸濁液およびポリスチレン系粒子懸濁液を用いて凝集剤添加量を変化させた凝集実験から、凝集剤の適正添加量までは凝集沈殿効果が高まるものの、過剰な添加は未凝集の粒子数を増加させ、濁度上昇が発生する要因となり得ることが示された。また、ピコ植物プランクトンのゼータ電位は凝集剤の適正添加によっても凝集の適正範囲に到達せず、凝集沈殿除去性を低下させていることが明らかになった。

水資源機構の有するデータ整理の結果、濁水長期化はダム貯水池により大きな差があり、中には濁水が年間で 251 日間に及んだダム貯水池があることがわかった。水道統計の解析から、16 年間の経年変化として、原水濁度の最高値が高かった浄水場数の増加傾向は認められなかった。また、16 年間で原水濁度の年間最高値が 500 度以上になったのが 1 年のみであった浄水場が半数を占めたが、4 年以上年間最高値が 500 度以上になった浄水場が 18 施設あった。平成 29 年 7 月の九州北部豪雨についての調査の結果、筑後川の水位が上昇し、従来にないほど原水濁度が増加した（最高 7,600 度）こと、また水道事業体では、PAC 注入率の増量、別水源の活用等により対応し、浄水の濁度の上昇等を回避することができたことがわかった。

16S rRNA 遺伝子アンプリコンシーケンシングを行い、長沢浄水場ろ過水から 18 属が主要な細菌として検出された。主要な細菌の中で *Flavobacterium* 属、*Sediminibacterium* 属、*Limnohabitans* 属、*Crenothrix* 属、*Methylocaldum* 属は宮ヶ瀬湖において総リード数に占める割合が 1%を超え、細菌群集における主要な構成細菌と考えられた。浄水場ろ過水における主要な細菌の実湖沼における分布は、表層に分布するもの、中層・底層に分布するもの、全層に分布するものと、細菌の種類によって深度方向の分布が異なることが明らかとなった。

生ぐさ臭の分析において、昨年度までの LC/MS による検討に代えて、におい嗅ぎシステムを装備した GC に高分解能質量分析を接続した GC/MS による検討を実施した結果、生ぐさ臭の原因生物であるウログレナが発生した際に採取した水道原水と、ウログレナの培養液を分析した結果、共通する臭気成分が 3 成分発見された。

ジェオスミン、2-MIB 産生藍藻類について、NIES 株を用いて各物質の産生状況を測定した。その結果、ジェオスミンは藻体内で保持しており、2-MIB は藻体外に局在していることを示した。また、2-MIB 合成に関与するメチルトランスフェラーゼ遺伝子 (*mts* 遺伝子) の発現解析を行った結果、細胞密度が低い増殖初期で *mts* 遺伝子発現量が最大となり、その後細胞密度が高い増殖後期では発現量が低下する傾向が確認された。さらにジェオスミ

ン産生・非産生藍藻類を簡易に識別する方法の開発を試みた結果、*geoA* 遺伝子を標的とした whole-cell PCR 法 (Cell Direct PCR 法) が開発された。以上から、カビ臭発生予測法としてのカビ臭物質産生藍藻類の個体群密度の定量法を開発するとともに、カビ臭発生前後での上水処理管理に資するカビ臭の局在を明らかにした。

2-MIB の粉炭吸着において、超純水中に比べて、水道原水では平衡吸着量が 38~75% に低下することがわかった。また、分子量 1~3 kDa 程度の、励起 220 nm/蛍光 415 nm 付近に蛍光ピークを有する有機物が、水道原水中での 2-MIB 平衡吸着に対する競合成分の一つと推測された。5 種類の粉炭に対する Geosmin と 2-MIB の吸着量を確認したところ、Geosmin のほうが吸着されやすいことが確認された。さらに、各浄水場と、活性炭の生産拠点を可視化するデータベースを作成し、これを活用して、各浄水場における薬品調達の脆弱性を評価する手法を確立した。

平成 28 年台風 10 号に関して、岩手県下閉伊郡岩泉町の視察により、山間部の小さな河川の急激な水位変化に伴う水道施設被害の大きさを確認した。また、北海道地域での簡易水道での被害と降水の関係を、水源流域を含めた形で可視化した。さらに南富良野町幾寅では、今回被害をもたらした降水が、同観測地点の過去 40 年間に例を見ない豪雨であり、気候変動によって増加する懸念のある豪雨対策の重要性が伺えた。

世代シーケンサーを用いたろ過漏出障害原因微生物の給配水系での挙動を追跡し、門レベルの解析では、時期により比率が異なるが、Proteobacteria が高い割合を示した。また、Cyanobacteria (植物プランクトンの葉緑体を含む) が一定割合検出された。綱レベルの解析を行ったところ、Alphaproteobacteria 綱(Rhizobiales 目)が優占した。また、特徴的に沈澱池で割合が増える細菌、ろ過池で割合が増える細菌などを見つけることができた。

過去 15 年間に発生した世界の大規模災害における感染症の流行を調査した結果、2004 年 12 月のスマトラ島沖地震による津波後には、大規模な流行には至らなかったこと、スリランカでは政府の早期からの塩素消毒飲用水と衛生的な居住環境の供給の徹底が奏功したことがわかった。2005 年 8 月のハリケーン・カトリーナ後には、テキサス州ヒューストンの避難所において感染性胃腸炎の集団発生があり、患者便試料からはノロウイルスが検出された。2011 年 3 月の東北地方太平洋沖地震後の福島県郡山市の避難所においても、ノロウイルスによる感染性胃腸炎の集団発生が見られた。災害発生後の水系感染による胃腸炎流行の報告は確認されなかったが、避難所の汚物、汚染物処理の不備や、トイレが衛生的でなかったことにより、集団発生が起こった可能性が指摘された。途上国においては、津波や洪水の発生後に創傷感染による破傷風やレプトスピラ症の流行があり、傷口を洗浄し衛生的に保つための安全な水の供給が不可欠であると考えられた。また、国際的な動向として、SDGs のターゲットや気候変動を考慮した WSPs 策定ガイダンスにおいて、災害時における感染症対策に関する言及が見られた。

A. 研究目的

持続可能な水道システム構築において、危機管理への対応、安全な水の供給、ならびに水道サービスの持続性が必要とされており、大規模地震等の広域災害、気候変動による大雨降水量に伴う原水高濁度化や無降水日の増加による渇水、また水温上昇に伴う生物障害

への対策は、今後の持続可能な水道システム構築の要諦である。一方で、水道システムにおいても気候変動の緩和がより一層求められる状況から、本研究では「大規模災害や気候変動に伴う利水障害に対応した環境調和型水道システム」の提案を目指し、研究期間内に以下の 3 つの検討を実施した。

- ①流域システムの水管理対策に関する研究
- ②気候変動に伴う生物障害対策に関する研究
- ③水道システムの環境調和と持続可能性の評価に関する研究

B. 研究方法

ピコ植物プランクトン懸濁液およびポリスチレン系粒子懸濁液を用いて凝集剤添加量を変化させた凝集実験を行い、凝集沈殿除去特性を検討した。

水害による水道原水の濁度上昇に着目し、ダム貯水池および水道システムへの影響を解析し、対応策を検討した。まず、水資源機構が管理しているダム貯水池の濁水長期化についてデータを整理した。また、平成 12 年度から平成 27 年度までの水道統計における全国の浄水場の原水濁度の最高値の傾向を解析した。さらに、平成 29 年 7 月に発生した九州北部豪雨について、水道原水の濁度上昇の状況および水道事業者の対応について調査を行った。

16S rRNA 遺伝子アンプリコンシーケンシングの結果、長沢浄水場のろ過水で主要であった細菌が実際のダム湖においてどのような消長を示しているのか検討を行った。

生ぐさ臭の分析において、昨年度までの LC/MS による検討に代えて、におい嗅ぎシステムを装備した GC に高分解能質量分析を接続した GC/MS による検討を実施した。生ぐさ臭の原因生物であるウログレナが発生した際に採取した水道原水と、ウログレナの培養液を分析した。

水源におけるカビ臭発生予測手法の構築を目的とし、個体群数定量に必要なカビ臭物質合成遺伝子の確認および簡易なカビ臭物質産生藍藻類の定量方法の開発を実施した。ジェオスミン産生藍藻類は、ジェオスミン合成酵素遺伝子 *geoA* ホモログを用いて、個体群数を定量できることから、形態観察では判別が困難なジェオスミン産生・非産生藍藻類を簡易に識別する方法について、*geoA* 遺伝子を用いた手法の開発を試みた。

異臭味対策として広く使用される粉末活性炭（粉炭）の吸着特性を解明するため、全国 21 か所の水道原水中での 2-MIB の粉炭への平衡吸着量を実測し Freundlich 式で整理した。また、5 種類の粉炭に対する Geosmin と 2-MIB の吸着量を確認した。さらに、各浄水場の粉炭需要とその生産拠点を可視化するデータベースを作成した。

平成 28 年台風 10 号に関して、甚大な被害をうけた岩手県下閉伊郡岩泉町の視察を行った。また、北海道地域での簡易水道での被害と降水の関係を、水源流域を含めた形で可視化した。

次世代シーケンサーを用いたろ過漏出障害原因微生物の同定技術を給水栓水に適用し、ろ過漏出原因微生物の給配水系での挙動を 1 年間にわたり調査した。

世界で過去 15 年間に発生した大規模災害に着目し、被災地における水系感染症及び蚊媒介感染症の発生状況や飲料水の水質に関する情報を整理した。

C. 研究結果および D. 考察

ピコ植物プランクトン懸濁液およびポリスチレン系粒子懸濁液を用いて凝集剤添加量を変化させた凝集実験の結果、凝集剤添加量と濁度や粒径毎の粒子数の関係から、適正添加量までは凝集沈殿効果が高まるものの、過剰な添加は未凝集の粒子数を増加させ、濁度上昇が発生する要因となり得ることが示された。また、上澄水に残留する粒子のゼータ電位の結果から、ピコ植物プランクトンのゼータ電位は凝集剤の適正添加によっても凝集の適正範囲（ $-10\sim 10\text{mV}$ ）に到達せず、凝結反応が進まないことが凝集沈殿除去性を低下させていることが明らかになった。したがって、ろ過漏出障害の回避のためにジャーテストによって詳細に凝集剤最適添加量を求めて適正添加につとめること、適正添加量の範囲で凝集沈殿を行い粗大化させたフロックを除去し、あらためて凝集剤を添加して成長させたフロックをろ過によって除去する二段凝集は効果的であること、二段凝集

において凝集剤の添加量が多い場合はろ過継続時間が短縮し、アルミニウム漏出の可能性も高まることから、凝集沈殿におけるジャーテストのような適正添加量を決定できる簡便な二段凝集テストを開発する必要があること等が対策として重要であると考えられた。

ダム貯水池の濁水長期化データ整理の結果、ダム貯水池により大きな差があり、中には濁水が年間で 251 日間に及んだダム貯水池があることがわかった。水道統計解析の結果、16 年間の経年変化として、原水濁度の最高値が高かった浄水場数の増加傾向は認められなかった。平成 13 年度は、高濁度となった浄水場数が多く、平成 20 年度および平成 21 年度は少なかった。16 年間で原水濁度の年間最高値が 500 度以上になったのが 1 年のみであった浄水場が半数を占めたが、4 年以上年間最高値が 500 度以上になった浄水場が 18 施設あった。18 施設のうち、8 施設が北海道、5 施設が関東地方の浄水場であった。平成 29 年 7 月に発生した九州北部豪雨についての調査の結果、水道事業体の取水地点が存在する久留米市の降水量は 100mm/日程度であったが、上流部では局地的に 500mm/日以上の降水量が観測され、筑後川の水位が上昇し、従来にないほど原水濁度が増加した（最高 7,600 度）。水道事業体では、PAC 注入率の増量、別水源の活用等により対応し、浄水の濁度の上昇等を回避することができた。原水濁度や上流地域の降水量の監視、近隣水道事業体、関係機関との情報交換、代替水源の有効性等が確認された。

長沢浄水場ろ過水から 18 属が主要な細菌として検出された。主要な細菌の中で *Flavobacterium* 属、*Sediminibacterium* 属、*Limnohabitans* 属、*Crenothrix* 属、*Methylocaldum* 属は宮ヶ瀬湖において総リード数に占める割合が 1%を超え、細菌群集における主要な構成細菌と考えられた。浄水場ろ過水における主要な細菌の実湖沼における分布は、表層に分布するもの、中層・底層に分布するもの、全層に分布するものと、細

菌の種類によって深度方向の分布が異なることが明らかとなった。

生ぐさ臭の原因生物であるウログレナが発生した際に採取した水道原水と、ウログレナの培養液を分析した結果、両者は、水源が異なる浄水場関連施設から採取した試料だが、共通する臭気成分が 3 成分発見された。しかし、本研究で用いたイオン化法では、それらのうちの 2 成分をイオン化できなかった。イオン化できた 1 成分の m/z は 146.962 であった。

2-MIB 合成には、様々な合成に関与するメチルトランスフェラーゼ遺伝子 (*mts* 遺伝子) が関与するため、発現解析を行った。加えて、形態観察では判別が困難なジェオスミン産生・非産生藍藻類を簡易に識別する方法の開発を試みた。これらの結果、ジェオスミン産生藍藻類として用いた *Dolichospermum smithii* NIES-824 では、ジェオスミン産生後、細胞内に保持する傾向にあったが、2-MIB 産生藍藻類として用いた *Pseudanabaena galeata* NIES-512 では、ほとんどが細胞外に局在した。2-MIB 合成に関与する *mts* 遺伝子の発現量は、細胞密度が低い増殖初期が最大となり、細胞密度が高い増殖後期では、低かった。一方、ジェオスミン産生藍藻類の簡易識別法として、*geoA* 遺伝子を標的とした whole-cell PCR 法 (Cell Direct PCR 法) を開発した。以上から、カビ臭発生予測法としてのカビ臭物質産生藍藻類の個体群密度の定量法を開発するとともに、カビ臭発生前後での上水処理管理に資するカビ臭の局在を明らかにした。

水道原水中での 2-MIB の粉炭への平衡吸着量を実測し Freundlich 式で整理したところ、1 $\mu\text{g/L}$ の 2-MIB 平衡濃度下では、超純水中に比べて、水道原水では平衡吸着量が 38~75% に低下することがわかった。また、分子量 1~3 kDa 程度の、励起 220 nm/蛍光 415 nm の蛍光ピークを有する有機物が、水道原水中での 2-MIB 平衡吸着に対する競合成分の一つと推測された。5 種類の粉炭に対する Geosmin と 2-MIB の吸着量を確認したとこ

ろ、Geosmin のほうが吸着されやすいことが確認された。また、石炭系粉炭では、構造の違いが吸着質に与える影響の違いの可能性が示唆された。さらに、各浄水場の粉炭需要とその生産拠点を可視化するデータベースを作成し、これを活用して、各浄水場における薬品調達の脆弱性を評価する手法を確立した。

平成 28 年台風 10 号に関して、岩手県下閉伊郡岩泉町の視察により、取水設備の流出や浄水設備の水没等、同地の水道設備が依存する、山間部の小さな河川の急激な水位変化に伴う被害の大きさを確認した。また、北海道地域での簡易水道での被害と降水の関係を、水源流域を含めた形で可視化することで、水源流域での降水の様子が明らかとなった。さらに、南富良野町幾寅では、今回被害をもたらした降水が、同観測地点の過去 40 年間に例を見ない豪雨であり、気候変動によって増加する懸念のある豪雨対策の重要性が伺えた。

次世代シーケンサーを用いた、ろ過漏出原因微生物の給配水系での挙動の調査の結果、門レベルの解析では、時期により比率が異なるが、Proteobacteria が高い割合を示した。また、Cyanobacteria(植物プランクトンの葉緑体を含む)が一定割合検出された。門レベルの解析で優占した Proteobacteria 門について綱レベルの解析を行ったところ、Alphaproteobacteria 綱(Rhizobiales 目)が優占した。給水栓水から検出された細菌の水道システム内の遷移を解析したところ、特徴的に沈澱池で割合が増える細菌、ろ過池で割合が増える細菌などを見つけることができた。水道施設内でそれぞれの細菌が局在し場所によって増減していることが示唆された。

過去 15 年間に発生した世界の大規模災害調査の結果、2004 年 12 月のスマトラ島沖地震による津波後には、被災地において下痢症、コレラ、赤痢、チフス等の発生が見られたが、大規模な流行には至らなかったこと、スリランカ政府が水系感染症の流行対策として早期から塩素消毒された飲用水と衛生的な居

住環境の供給を徹底したため、給水タンクや井戸の水は微生物学的に概ね良好な水質だったことがわかった。2005 年 8 月に米国ルイジアナ州を襲ったハリケーン・カトリナ後には、テキサス州ヒューストンの避難所において 1169 人の感染性胃腸炎の集団発生があり、患者便試料からはノロウイルスが検出された。2011 年 3 月の東北地方太平洋沖地震後の福島県郡山市の避難所においても、ノロウイルスによる感染性胃腸炎の集団発生が見られた。災害発生後に病原体によって汚染された水を原因とした感染症流行の報告は確認されなかったが、避難所において汚物や汚染物が適切に処理されなかったり、トイレが衛生的でなかったために、感染性胃腸炎の集団発生が起こった可能性が指摘された。また、途上国においては、津波や洪水の発生後に創傷感染による破傷風やレプトスピラ症の流行があり、傷口を洗浄し衛生的に保つためには、衛生的な環境に加えて安全な水の供給が不可欠であると考えられた。

E. 結論

凝集剤添加量と濁度や粒径毎の粒子数の関係から、適正添加量までは凝集沈殿効果が高まるものの過剰な添加は未凝集の粒子数を増加させ、濁度上昇が発生する要因となり得ることが示された。また上澄水に残留する粒子のゼータ電位の結果から、ピコ植物プランクトンは凝集剤の添加によってもゼータ電位が適正な凝集範囲に到達しないため、凝結反応が進まないことが凝集沈殿除去性を低下させていることが明らかになった。

水道原水となる河川水の濁度について、最も情報量が豊富と考えられる水道統計について可能な解析を行い、高濁度となる原因、地域差などを一定程度解明することができた。また、平成 29 年 7 月に発生した九州北部豪雨に関して関係水道事業者から情報を提供してもらい、対応状況等を整理することができ、大規模災害や気候変動に対する水供給システムの適応性指標や大規模災害や気

候変動に伴う利水障害に対応した環境調和型の水供給システムの条件を示すことができた。

水源におけるろ過漏出障害原因微生物の季節的な推移、分布を評価する上で次世代シーケンサーによる 16S rRNA 遺伝子アンプリコン解析は有用である。浄水場ろ過水における主要な細菌の実湖沼における分布を調べたところ、表層に分布するもの、中層・底層に分布するもの、全層に分布するものと、細菌の種類によって深度方向の分布が異なることが明らかとなった。

生ぐさ臭の原因生物であるウログレナが発生した際に採取した水道原水と、ウログレナの培養液を分析した結果、共通する臭気成分が 3 成分発見された。

NIES 株を用いて藻体内でのジェオスミン、2-MIB 産生状況を把握した結果、各物質の藻体内外での局在状況が株ごとに異なることを示した。

2-MIB の粉炭吸着において、超純水中に比べて、水道原水では平衡吸着量が 38~75% に低下することがわかった。また、分子量 1~3 kDa 程度の、励起 220 nm/蛍光 415 nm の蛍光ピークを有する有機物が、水道原水中での 2-MIB 平衡吸着に対する競合成分の一つと推測された。5 種類の粉炭に対する Geosmin と 2-MIB の吸着量を確認したところ、Geosmin のほうが吸着されやすいことが確認された。さらに、各浄水場と、活性炭生産拠点を可視化するデータベースを作成し、これを活用して、各浄水場における薬品調達の脆弱性を評価する手法を確立した。

平成 28 年台風 10 号に関して、岩手県下閉伊郡岩泉町の視察により、山間部の小さな河川の急激な水位変化に伴う被害の大きさを確認した。また、北海道地域で被害のあった簡易水道の水源流域における降水の様子が明らかとなった。さらに、南富良野町幾寅では、過去 40 年間に例を見ない豪雨であり、気候変動によって増加する懸念のある豪雨対策の重要性が伺えた。

次世代シーケンサーを用いた、ろ過漏出原

因微生物の給配水系での挙動の調査の結果、Proteobacteria が高い割合を示した。また、Cyanobacteria(植物プランクトンの葉緑体を含む)が一定割合検出された。Proteobacteria 門について綱レベルの解析を行ったところ、Alphaproteobacteria 綱(Rhizobiales 目)が優占した。給水栓水から検出された細菌について、特徴的に沈澱池で割合が増える細菌、ろ過池で割合が増える細菌などを見つけることができた。

世界で過去 15 年間に発生した大規模災害として、スマトラ島沖地震(2004 年 12 月)、ハリケーン・カトリーナ(2005 年 8 月)、台風 Ketsana(2009 年 9 月)、東北地方太平洋沖地震(2011 年 3 月)、及びタイ洪水(2011 年 6 月)における水系感染症及び蚊媒介性感染症の流行状況を調査した結果、スマトラ島沖地震による津波後にはアチェ州においてマラリアの流行が、ハリケーン・カトリーナ及び東北地方太平洋沖地震後には避難所においてノロウイルスによる感染性胃腸炎の流行が確認された。途上国の被災地においては、下痢症、コレラ、赤痢、チフス等の発生が見られたが、大規模な流行には至らなかった。一方で、津波や洪水の発生後に創傷感染による破傷風やレプトスピラ症の流行があり、傷口を洗浄し衛生的に保つためには、衛生的な環境に加えて安全な水の供給が不可欠であると考えられた。また、国際的な動向として、SDGs のターゲットや気候変動を考慮した WSPs 策定ガイダンスにおいて、災害時における感染症対策に関する言及が見られた。

G. 研究発表

1) 論文発表

藤本尚志,山崎雄佑,遠藤沙紀,渡邊英梨香,蔣紅与,大西章博,藤瀬大輝,三浦尚之,秋葉道宏. 16S rRNA 遺伝子の解析による浄水場処理工程水のピコシアノバクテリア生物相の評価, 用水と廃水 59(9), 667-674, 2017.

2) 学会発表

下ヶ橋雅樹, 秋葉道宏. 水道システムの気候

- 変動への適応, 第 30 回環境工学連合講演会, 2017 年 5 月, 東京, 同講演集, 51-54.
- Yuta Shinfuku, Hirokazu Takanashi, Tsunenori Nakajima, Akira Ohki, Masaki Sagehashi and Michihiro Akiba. Exploring a fishy-smelling compound in raw waters with high resolution mass spectrometry and multivariate analysis, 26th Symposium on Environmental Chemistry, 2017 年 6 月, Shizuoka, 同講演集, 120.
- Yuta Shinfuku, Hirokazu TAKANASHI, Tsunenori Nakajima, Akira Ohki, Masaki Sagehashi and Michihiro Akiba Exploring a Fishy-Smelling Substance in Raw Waters for Water Supply with High Resolution Mass Spectrometry and Multivariate Analysis, Water and Environment Technology Conference 2017, 2017 年 7 月, Sapporo, 同講演集, 51.
- 新福優太, 高梨啓和, 中島常憲, 大木章, 下ヶ橋雅樹, 秋葉道宏 高分解能質量分析計と多変量解析による水道水生ぐさ臭原因物質の探索 環境科学会 2017 年会, 2017 年 9 月, 東京, 同講演集, 2.
- 新福優太, 高梨啓和, 中島常憲, 大木章, 下ヶ橋雅樹, 秋葉道宏. DNPH 誘導体化における測定妨害物質の除去を目的とした固相抽出の適用, 第 20 回日本水環境学会シンポジウム, 2017 年 9 月, 和歌山, 同講演集, 123.
- 山内康正, 下ヶ橋雅樹, 秋葉道宏. 水道水源流域の水収支の数理モデル化と気候変動影響評価ー埼玉県営水道の地球温暖化適応策の検討ー, 平成 29 年度全国会議(水道研究発表会), 2017 年 10 月, 高松市, 同講演集, 844-845.
- 靱山将, 下ヶ橋雅樹, 秋葉道宏. 水文モデルを用いた相模ダム流域の気候変動影響評価, 平成 29 年度全国会議(水道研究発表会), 2017 年 10 月, 高松市, 同講演集, 212-213.
- 下ヶ橋雅樹, 島昌伸, 嶽仁志, 小坂浩司, 島崎大, 秋葉道宏, アンケート調査による平成 28 年熊本地震の応援給水活動の実態把握と課題の抽出, 平成 29 年度全国会議(水道研究発表会), 2017 年 10 月, 高松市, 同講演集, 884-885.
- 清水和哉, 穂山紗耶, 月野慎也, Hanchen Miao, 内海真生, 秋葉道宏. 栄養塩が及ぼす藍藻類のカビ臭物質産出への影響, 第 54 回日本水処理生物学会年会, 2017 年 11 月, 吹田市, 日本水処理生物学会誌別巻 (37), 19.
- 館祥之, 多田早奈恵, 坂巻隆史, 野村宗弘, 西村修. ピコ植物プランクトンの凝集処理におけるフロック径分布, 第 54 回日本水処理生物学会年会, 2017 年 11 月, 吹田市, 日本水処理生物学会誌別巻 (37), 62.
- 新福優太, 高梨啓和, 中島常憲, 大木章, 下ヶ橋雅樹, 秋葉道宏. DNPH 誘導体化アルデヒドを LC/MS で測定する際の妨害物質の除去, 第 52 回日本水環境学会年会, 2018 年 3 月, 札幌市, 同講演集, 120.
- 館祥之, 多田早奈恵, 野村宗弘, 坂巻隆史, 西村修. ピコ植物プランクトン凝集処理において上澄み水に残留する粒子の特性, 土木学会東北支部技術研究発表会, 2018 年 3 月, 同講演 CD-ROM, VII-63
- 下ヶ橋雅樹, 三浦尚之, 平島邦人, 佐野大輔, 西村修, 秋葉道宏. 平成 28 年台風 10 号による東北・北海道での水道被害と降水特性, 第 52 回日本水環境学会年会, 2018 年 3 月, 札幌, 同講演集, 474.
- 下ヶ橋雅樹, 藤井隆夫, 高梨啓和, 秋葉道宏. 水道におけるカビ臭物質の吸着に与える活性炭構造の影響, 化学工学会第 83 年会, 2018 年 3 月, 吹田市, 同講演オンライン要旨 O220.
- 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

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

大規模災害および気候変動に伴う利水障害
に対応した環境調和型水道システムの構築
に関する研究

平成29年度 分担研究報告書

平成30（2017）年 3月

分担研究報告書 1

ろ過漏出障害を回避するための
浄水処理プロセスの開発

研究代表者 秋葉 道宏
研究分担者 西村 修

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）
「大規模災害および気候変動に伴う利水障害に対応した
環境調和型水道システムの構築に関する研究」
分担研究報告書

研究課題：ろ過漏出障害を回避するための浄水処理プロセスの開発

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

ろ過漏出は給水の継続にも影響を及ぼす重大な障害であり、ピコ植物プランクトンは主要な原因生物である。これを改善するために凝集剤を多量に添加するなどの対策が取られるが、ピコ植物プランクトンの漏出メカニズムは未解明であり、最適な凝集方法は確立されていない。そこで本研究では、ピコ植物プランクトン懸濁液およびポリスチレン系粒子懸濁液を用いて凝集剤添加量を変化させた凝集実験を行い、凝集沈殿除去特性を検討した。

その結果、凝集剤添加量と濁度や粒径毎の粒子数の関係から、適正添加量までは凝集沈殿効果が高まるものの、過剰な添加は未凝集の粒子数を増加させ、濁度上昇が発生する要因となり得ることが示された。

また、上澄水に残留する粒子のゼータ電位の結果から、ピコ植物プランクトンのゼータ電位は凝集剤の適正添加によっても凝集の適正範囲（ $-10\sim 10\text{mV}$ ）に到達せず、凝結反応が進まないことが凝集沈殿除去性を低下させていることが明らかになった。

したがって、ろ過漏出障害の回避のためにジャーテストによって詳細に凝集剤最適添加量を求めて適正添加につとめること、適正添加量の範囲で凝集沈殿を行い粗大化させたフロックを除去し、あらためて凝集剤を添加して成長させたフロックをろ過によって除去する二段凝集は効果的であること、二段凝集において凝集剤の添加量が多い場合はろ過継続時間が短縮し、アルミニウム漏出の可能性も高まることから、凝集沈殿におけるジャーテストのような適正添加量を決定できる簡便な二段凝集テストを開発する必要があること等が対策として重要であると考えられた。

A. 研究目的

近年、全国の浄水場や水道事業体において生物障害の発生が問題となっており、中でも異臭味障害に次いで発生しているろ過漏出障害が増加傾向にある¹⁾。ろ過漏出障害は、主に $0.2\sim 2\mu\text{m}$ の非常に微小なピコ植物プランクトンによって発生すると言われており²⁾、浄水場では発生時の対応に苦慮している。原水のピコ植物プランクトン細胞数が高まった際、浄水場では凝集剤の添加量を増加させる方法や、通常の凝集沈殿処理に加えてろ過池直前で再度凝集剤を添加する方法で

ある二段凝集によって対応しているが^{3, 4)}、最適な処理条件に関する知見が乏しいことや、根本的なろ過漏出発生メカニズムが明確でないことが課題として挙げられる。また、凝集剤の適正量を超えた多量添加は、凝集効果を悪化させるといった研究報告があり⁵⁾、ピコ植物プランクトンの凝集処理においてもそのような傾向が認められたことから⁶⁾、プロセスの改善が必要であると考えられる。

そこで、本研究では、ピコ植物プランクトンの凝集阻害のメカニズムの解明と凝集処理プロセスの改善方法を探ることを研究目

的とし、ピコ植物プランクトン懸濁液を用いて凝集実験を行った。そして、凝集沈殿後に上澄水に残留する粒子に着目し、濁度、粒径毎の粒子数、ゼータ電位を測定し、凝集・沈殿によって除去されない粒子の特性を解析した。なお、濁度標準液に用いられるポリスチレン系粒子懸濁液を用いて同様の実験を行い、非生物系粒子における凝集沈殿特性との比較も行なった。

B. 研究方法

1) ピコ植物プランクトン懸濁液を用いた凝集実験

本研究で用いたピコ植物プランクトンは、(独)国立環境研究所 NIES-1348 の *Synechococcus* sp. である。CB 培地にて温度条件 20 ± 1 °C, 光条件 $18 \mu \text{mol photons/m}^2/\text{sec}$, 12-h light/12-h dark で培養を行った。培養した *Synechococcus* sp. を一晩曝気した水道水で濁度が 2 度程度になるよう希釈し、これを原水として使用した。ジャーテスターは宮本理研社の WATER COHESION REACTION TESTER を使用した。ジャーテストの攪拌条件は、衛生工学実験指導書 (プロセス編)⁷⁾ を参考に、急速攪拌 (100 rpm) 1 分経過後に凝集剤を添加し、さらに 5 分間の急速攪拌 (100 rpm), 15 分間の緩速攪拌 (30 rpm), 静置は 30 分間とした。凝集剤には PAC を用い、添加量を 0, 20, 40, 60, 80, 100 (mg/L) とした。

凝集沈殿後の上澄水における濁度と粒径毎の粒子数を測定した。濁度の測定は日本電色工業社の水質濁度・色度計 WA6000 を用い、10cm 石英セルにて測定した。測定精度は 0.02 度である。ピコ植物プランクトンは、特有の波長の紫外レーザーを生物粒子に照射し、細胞内の自家蛍光物質が発する微弱な蛍光を検出することで、染色などの前処理なしでピコプランクトンの数と大きさを測定できる、リオン株式会社のピコプランクトンカウンタ XL-10A を用いて測定した。

また、ゼータ電位に関しては上澄水に残留する粒子に加えて、採取した沈殿物をゆるく

ガラス棒で攪拌して懸濁させてフロックも測定した。装置はゼータメーター Micro-Electrophoresis Apparatus Mark II (Rank Brothers, UK) である。

以上の実験は 3 回繰り返して、結果の再現性を確認した。

2) ポリスチレン系粒子懸濁液を用いた凝集実験

生物系粒子であるピコ植物プランクトンと非生物系粒子の凝集特性を比較するため、濁度標準液に用いられるポリスチレン系粒子の懸濁液を用いた凝集実験を行った。ポリスチレン系粒子は JSR Life Science 社製の粒子直径 $10.14 \mu \text{m}$ である。

ジャーテストの条件は、ピコ植物プランクトンの実験と基本的に同様である。ポリスチレン系粒子懸濁液においても原水濁度を 2 度程度に調整した。なお、凝集剤添加量は 0, 10, 20, 40, 80, 120 (mg/L) とした。

凝集沈殿後の上澄水における濁度と粒径毎の粒子数、上澄水に残留する粒子のゼータ電位、ならびに沈殿物を攪拌して懸濁させたフロックのゼータ電位を測定した。なお、ポリスチレン系粒子についてはピコプランクトンカウンタの散乱光を用いて粒子数を測定した。

C. 研究結果および D. 考察

1) ピコ植物プランクトン懸濁液を用いた凝集実験における濁度の変化

ピコ植物プランクトン懸濁液における凝集剤の添加量を変化させた場合の上澄水の濁度変化を図-1 に示した。3 回の実験のいずれの場合も、添加量 20mg/L までに顕著な濁度低下が起こり、わずかな凝集剤添加でもフロックの形成、沈殿除去が起こることが確認された。凝集剤添加量 20mg/L を超えると添加量増加に対する濁度低下の傾向は緩やかとなり、1 回目の実験では 60mg/L, 2 回目と 3 回目の実験では 80mg/L で濁度が最小値を示す最適添加量となった。さらに最適添加量以上に凝集剤を添加すると濁度が上昇し、この傾向は 3 回の実験に共通していた。すなわ

ち、凝集剤を添加し過ぎるとピコ植物プランクトンが凝集沈殿しにくくなるメカニズムがあると考えられた。

2) ピコ植物プランクトン懸濁液を用いた凝集実験における粒径毎の粒子数の変化

ピコ植物プランクトン懸濁液における凝集剤の添加量を変化させた際の上澄水の総粒子数の結果を図-2に示した。1回目の実験では濁度の結果と同様に、最適凝集剤添加量60mg/Lまでは粒子数が減少するが、80mg/Lでは大きく増加し、添加量として半分である40mg/Lの場合よりも総粒子数が多く残留する結果となった。2回目の実験では、最適凝集剤添加量80mg/Lよりも100mg/Lの添加量の方が総粒子数は少なかったが、その差は849に対して746個/mLとわずかであった。

3回目の実験では1回目の実験と同様に、最適凝集剤添加量80mg/Lで総粒子数が433個/Lまで減少し、100mg/Lでは892個/Lと倍増した。

以上の通り、濁度の結果で得られた最適凝集剤添加量まで濁度が低下し、それ以上の添加量では濁度が上昇する現象は、総粒子数の場合にも3回の実験のうち2回の実験で確認され、凝集剤の過剰添加は懸濁物質の除去を阻害することが明らかになった。

次に、3回目の実験における粒径毎の粒子数の変化を図-3に示した。ピコ植物プランクトン自体の粒径は1.0 μm 程度であるが、凝集剤無添加時の結果からもわかるように8.0 μm 以上の粒径を有する粒子もわずかではあるが存在する。なお、懸濁液作成に使用した実験室で作成しているMilli-Q水自体もごく少数ではあるが粒子を含んでいる。しかし、これは植物ピコプランクトン懸濁水の実験で得られた粒子数に比較して極めて小さく、無視できるレベルであった。

粒径別の凝集沈殿除去性の特徴としては、粒径1.0~2.0 μm の小さい粒子が残存する傾向が顕著である。この粒径の粒子が上澄水に残存するということは、凝集剤を添加してもフロックを形成しないピコ植物プランクトンが多量に存在することを意味する。

また、3回目の実験における粒径毎の粒子除去率の結果を図-4に示した。粒径1.0~2.0 μm の粒子に対しては少量の凝集剤では除去効果が見られなかったが、粒径2.0 μm 以上の粒子に対しては、少量の凝集剤でも効果があることが分かった。すなわち、凝集剤添加によってもフロックを形成しないピコ植物プランクトン(粒径1~2 μm)に比較して、小さくてもフロック化した粒子は80%以上除去され、その除去率は粒径が大きくなるほど高くなる傾向が見られた。

また、凝集剤添加量が過剰な100mg/Lの場合には1.0~2.0, 2.0~3.0 μm の粒子除去率が低下した。このことは凝集剤過剰添加時の濁度に見られた現象と同様であるが、この理由はほとんどフロック化しないピコ植物プランクトンが増加したためと考えられた。

凝集剤過剰添加時の再分散については、負荷電の粒子表面を正荷電の凝集剤ポリマーが完全に覆い、外見が正荷電のようになってしまうことで生じると説明される⁸⁾。本結果で認められた再分散の現象のメカニズムが荷電の逆転によるものなのかに関しては次項のゼータ電位の結果を基に考察する。

3) ピコ植物プランクトン懸濁液を用いた凝集実験におけるゼータ電位の変化

ピコ植物プランクトン懸濁液における凝集剤の添加量を変化させた際の上澄水の粒子のゼータ電位の結果を図-5に示した。ただし、2回目の実験では、凝集剤を添加する前からピコ植物プランクトンのゼータ電位が高すぎる値(通常ピコ植物プランクトンは-30mV以下を示す)を示したので、ここでは1, 3回目の結果で議論する。

沈殿物フロックのゼータ電位は凝集の適正範囲-10~10mVにあり、ほぼ0mVであった。一方、上澄水に残留する粒子のゼータ電位は、凝集剤無添加時のゼータ電位が-35mVであったのに対し、わずかな凝集剤添加によっても荷電が中和する方向に変化した(1回目:10mg/L添加で-28mV, 3回目:20mg/L添加で-20mV)。しかし、それ以上の添加量でも凝集の適正範囲にまで荷電が変化する

ことはなく、最大で1回目：60mg/L添加で-22mV、3回目：60mg/L添加で-18mVであり、荷電の逆転による再分散現象ではないことが明らかとなった。

ピコ植物プランクトン懸濁液の凝集沈殿実験において上澄水に残留する粒子の特徴としては、粒径が小さくほとんどフロックを形成していないと思われるピコ植物プランクトンであること、その表面電荷は凝集剤添加により荷電中和方向への変化が生じるものの、最適添加量でも凝集の適正範囲には至らないこと、さらに凝集剤添加量が多い場合は、フロックを形成しないピコ植物プランクトンが増えることが明らかになった。ピコ植物プランクトンの細胞数が高まった際に凝集剤添加量を増加させる対策においてはジャーテストによって具体的に詳細に最適添加量を求めることが重要であると言えよう。また、過剰な凝集剤添加時に再分散する現象は、荷電の逆転によるものではなく、添加した凝集剤が凝結反応（マイナスに帯電している微細粒子が凝集剤添加により荷電中和して微細フロックを形成）に働くより、むしろ微細フロックを成長させる凝集反応に働き、凝結反応が鈍化するためではないかと考えられた。

4) ポリスチレン系粒子懸濁液を用いた凝集実験における濁度の変化

ポリスチレン系粒子懸濁液における凝集剤の添加量を変化させた場合の上澄水の濁度変化を図-6に示した。実験における最小の添加量10mg/Lにおいて濁度は0mg/Lとなり、それ以上の添加量ではいずれも濁度0mg/Lであった。

すなわち、濁度の除去に関してはピコ植物プランクトン懸濁液の凝集で見られたような凝集剤添加量の増加で濁度が上昇する現象は認められなかった。

5) ポリスチレン系粒子懸濁液を用いた凝集実験における粒径毎の粒子数の変化

ポリスチレン系粒子懸濁液における凝集剤の添加量を変化させた際の上澄水の総粒子数の結果を図-7に示した。この場合は濁度

の結果と大きく異なり、凝集剤添加量0mg/Lと10mg/Lで総粒子数に大きな違いは認められなかった。この理由は図-8に示すように、凝集剤無添加において残留した粒子のほとんどが8 μ m以上の粒径をもつポリスチレン系粒子そのものであるのに対し、10mg/L添加時に残留した粒子は1~2 μ mの小さい粒子であり、測定していない1 μ m以下の粒子が凝集して形成した可能性が考えられた。

10~80mg/Lにかけては凝集剤添加量の増加とともに総粒子数は減少し、80mg/Lで119個/mLと最小値を示した。この結果は、ピコ植物プランクトン懸濁液の結果で得られた最適凝集剤添加量まで総粒子数（および濁度）が低下し、それ以上の添加量では総粒子数（および濁度）が上昇する結果に類似した。すなわちポリスチレン系粒子においても再分散現象が認められた。

図-8に示す粒径別の凝集沈殿除去性の特徴としては、粒径8.0 μ m以上のポリスチレン系粒子そのものは最適凝集剤添加量まで添加量の増加とともに粒子数を大きく低下させるものの、120mg/Lにおいては再び粒子数の増加がみられ、見かけ上凝集しない粒子が増える現象が認められた。これはピコ植物プランクトンにおける1~2 μ mの粒径に認められた現象であり、最適添加量を超えた過剰添加は凝集沈殿性の悪化をもたらすことがポリスチレン系粒子においても確認された。また、粒径1.0~2.0 μ mの粒子の凝集剤添加量に対する変化の傾向も、凝集剤無添加の場合を除きピコ植物プランクトンの実験結果と同様の傾向を示し、極めて小さな粒子は生物系、非生物系にかかわらず凝集沈殿除去が難しいことが明らかになった。

粒径毎の粒子除去率の結果を図-9に示した。なお、1.0~2.0 μ mの粒径についてはマイナスの除去率を示したためここでは除外した。最適凝集剤添加量においていずれの粒径の粒子も最大の除去率を示すことは、ピコ植物プランクトンの場合と同様であった。ただし、除去率でみるとピコ植物プランクトンの場合に比べて特に高いわけではなく、粒径

2.0~3.0 μm の除去率は最適添加量の時に最大であるものの60%にとどまり、非生物系粒子でも粒径の小さい場合は凝集沈殿除去率が低いことが確認された。

6) ポリスチレン系粒子懸濁液を用いた凝集実験におけるゼータ電位の変化

ポリスチレン系粒子懸濁液における凝集剤の添加量を変化させた際の上澄水の粒子のゼータ電位の結果を図-10に示した。

沈殿物フロックのゼータ電位は凝集の適正範囲-10~10mVにあり、ほぼ0mVであった。一方、上澄水に残留する粒子のゼータ電位は、凝集剤無添加時のゼータ電位が-36mVであったのに対し、10mg/Lとわずかな凝集剤添加によっても中和する方向に変化した(-12mV)。しかし、それ以上の添加量でも凝集の適正範囲である-10~10mVに入ることはなく、適正添加量80mg/Lでも-12mVであった。そして120mg/Lまで凝集剤添加量を増やすとほぼ0mVと中和された。

ポリスチレン系粒子においては120mg/Lで再分散現象が認められたが、この場合もピコ植物プランクトンの場合と同様に、荷電の逆転による再分散現象ではなく、むしろ上澄水に残留する粒子はほぼ0mVの荷電的には中和した粒子であることから、適正添加量以上の凝集剤を加えた場合、粒子の荷電中和に働くよりはむしろアルミフロックの形成が強化され、凝集剤と粒子の凝結反応が鈍るのではないかと考えられた。

ただし、観察したフロックは様々な粒径を持ち、ゼータ電位の結果の分散は大きいことから、凝集メカニズムの解明に当たってはより詳細な検討をする必要がある。

7) ピコ植物プランクトンを含む原水における凝集処理に関する指針案

これまでに行なってきた研究の成果を踏まえて、ろ過漏出障害を回避するための浄水処理プロセスについて、注意すべき基本的事項を以下にまとめる。

ろ過漏出障害を引き起こす原因生物としては、ピコプランクトン、緑藻類、珪藻類、藍藻類等が報告されており、中でもピコプラ

ンクトンは最も発生割合が高い障害生物である²⁾。ピコ植物プランクトンが発生した場合、浄水場では凝集剤添加量の増加、凝集pH条件の適正化、塩素処理による凝集効果改善などが検討される⁹⁾。また、ろ過水濁度が上昇した場合には二段凝集が効果的であることが知られている¹⁰⁾。

本研究で明らかになったように、1.0~2.0 μm の粒径をもつピコ植物プランクトン粒子の凝集沈殿による除去は困難である。このような粒子は荷電中和によってフロック化する凝結反応が起こりにくく、過剰に添加された凝集剤は凝結反応よりもフロックが粗大化する凝集反応に用いられ、未凝結の粒子が増加する凝集阻害の現象も発生する。したがって、最適凝集剤添加量を超えた凝集剤の添加は禁物であり、ジャーテストによって詳細に最適添加量を求め、凝集剤の適正添加につとめる必要がある。

しかし、凝集剤適正添加においてもピコ植物プランクトンを100%除去することは難しい。この場合は、二段凝集が効果的である。凝集沈殿によって粗大化したフロックを除去し、あらためて凝集剤を添加することで、フロックの成長を促す。その後のろ過によって粒径10 μm 以上の粒子は良好に除去されるため⁶⁾、凝集によって粗大化させにくいピコ植物プランクトンを除去することが可能となる。ただし、二段凝集においては凝集剤の添加量が多い場合ろ過継続時間が短縮し、アルミニウムの漏出の可能性も高まることから、適正添加が必要である。凝集沈殿におけるジャーテストのような適正添加量を決める簡便な二段凝集テストを開発する必要がある。

E. 結論

ピコ植物プランクトン懸濁液およびポリスチレン系粒子懸濁液を用いた凝集実験を行い、ろ過漏出障害を回避するための浄水処理プロセスの開発に関する基礎的知見をまとめた。

凝集剤添加量と濁度や粒径毎の粒子数の

関係から、適正添加量までは凝集沈殿効果が高まるものの過剰な添加は未凝集の粒子数を増加させ、濁度上昇が発生する要因となり得ることが示された。

上澄水に残留する粒子のゼータ電位の結果から、ピコ植物プランクトンは凝集剤の添加によってもゼータ電位が適正な凝集範囲(-10~10mV)に到達しないため、凝結反応が進まないことが凝集沈殿除去性を低下させていることが明らかになった。

G. 研究発表

1) 論文発表

該当なし

2) 学会発表

館祥之, 多田早奈恵, 坂巻隆史, 野村宗弘, 西村修, ピコ植物プランクトンの凝集処理におけるフロック径分布, 日本水処理生物学会誌別巻, (37), p.62, 2017

館祥之, 多田早奈恵, 野村宗弘, 坂巻隆史, 西村修, ピコ植物プランクトン凝集処理において上澄み水に残留する粒子の特性, 土木学会東北支部技術研究発表会(平成29年度)(CD-ROM), 2p., 2018

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) 秋葉道宏, 厚生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 24~26

年度総合研究報告書, 2015

- 2) 秋葉道宏, 厚生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 26 年度総括・分担研究報告書, 2015
- 3) 秋葉道宏, 厚生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, 2014
- 4) 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), pp.2-10, 2013
- 5) 丹保憲仁, 穂積準, フロック形成におよぼす凝集条件について, 衛生工学, 36, pp.37-47, 1968
- 6) 秋葉道宏, 厚生科学研究費補助金健康安全・危機管理対策総合研究事業「大規模災害および気候変動に伴う利水障害に対応した環境調和型水道システムの構築に関する研究」, 平成 28 年度総括・分担研究報告書, 2017
- 7) 社団法人土木学会, 衛生工学実験指導書(プロセス編), 1981
- 8) 丹保憲仁, 小笠原紘一, 浄水の技術, 技法堂出版, 1985
- 9) 中村寿子, 曾根田研, 宮田雅典, 武安一志, ピコ植物プランクトンに起因する浄水処理過程、ろ過水への濁度漏出とその対策について, 日本水処理生物学会誌, 33 (4), pp.233-243, 1997
- 10) 公益財団法人水道技術研究センター, 高濁度原水への対応の手引き, 2014
[http://www.jwrc-net.or.jp/chousa-kenkyuu/keinenka/koudakudo/0_all.pdf]

J. 謝辞

本研究を行うにあたり, 東北大学技術職員丸尾知佳子氏, 田中伸幸氏, および学生諸氏の協力を得た。ここに記して感謝の意を表す。

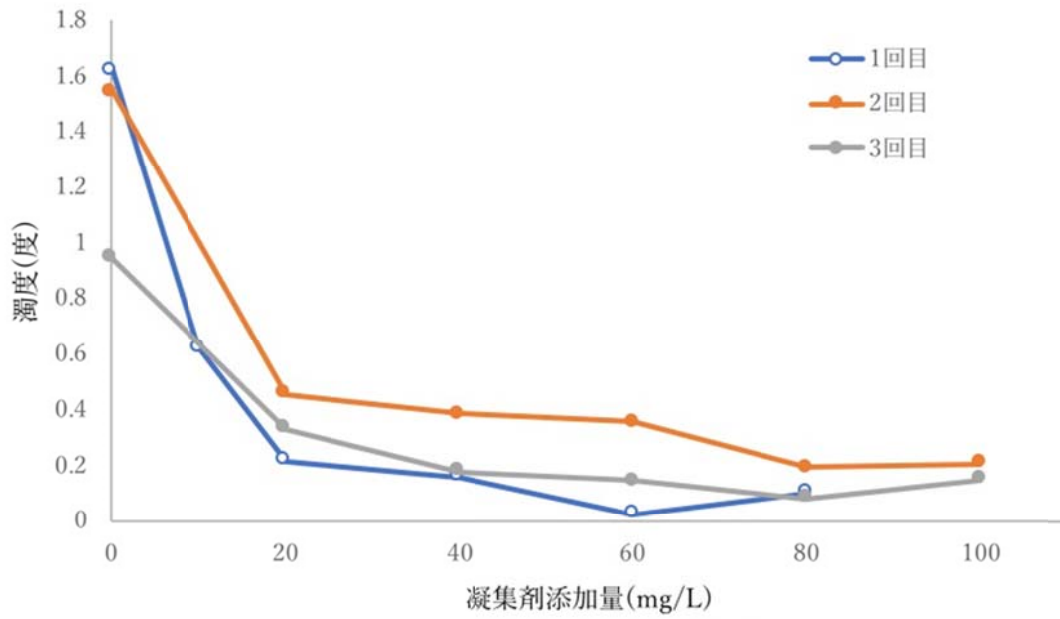


図-1 ピコ植物プランクトン懸濁液における凝集剤添加量に対する濁度変化

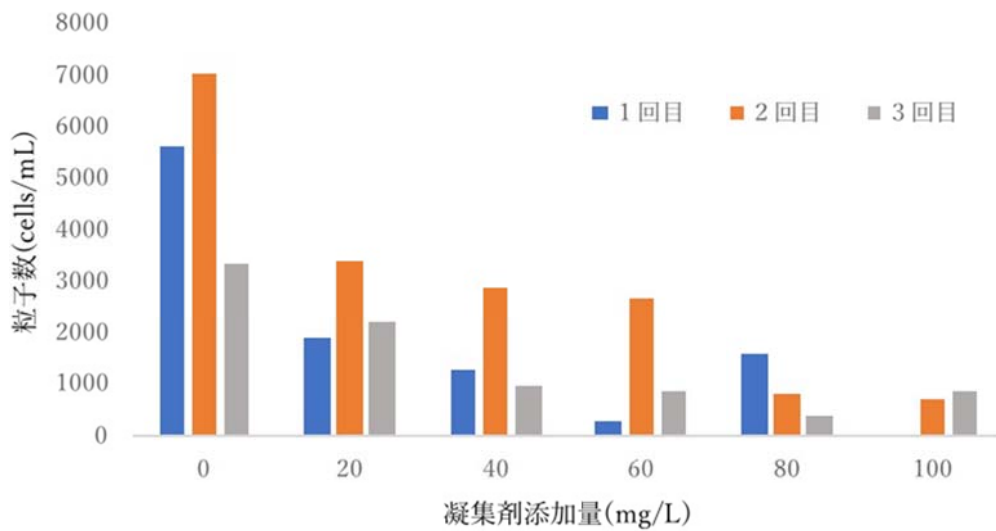


図-2 ピコ植物プランクトン懸濁液における凝集剤添加量に対する総粒子数の変化 (1回目の実験では100mg/Lを行わなかった)

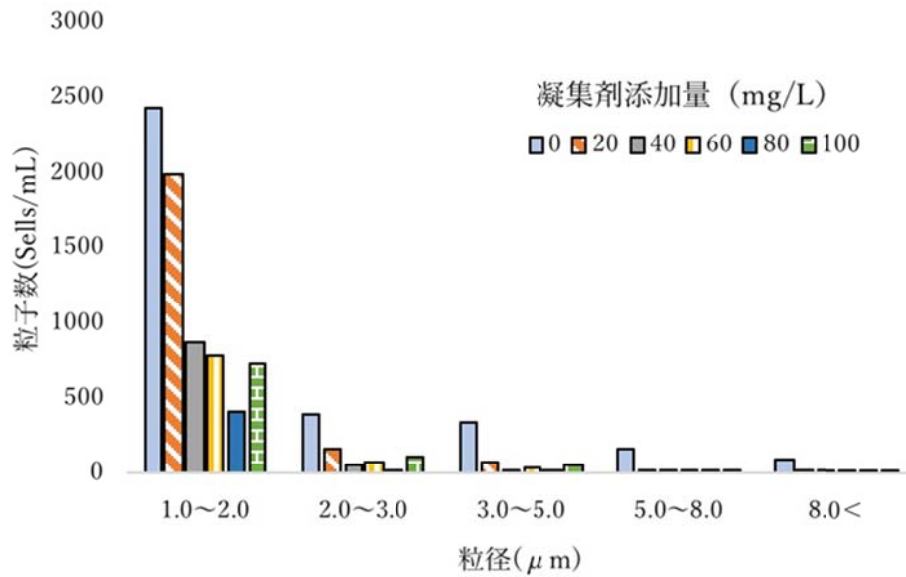


図-3 ピコ植物プランクトン懸濁液における粒径毎の粒子数の凝集剤添加量に対する変化

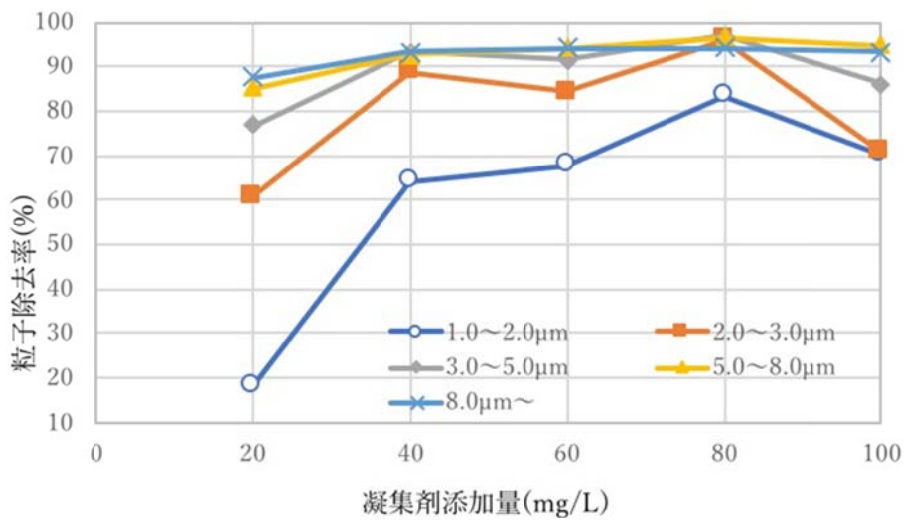


図-4 ピコ植物プランクトン懸濁液における凝集剤添加量に対する粒径毎の粒子除去率の変化

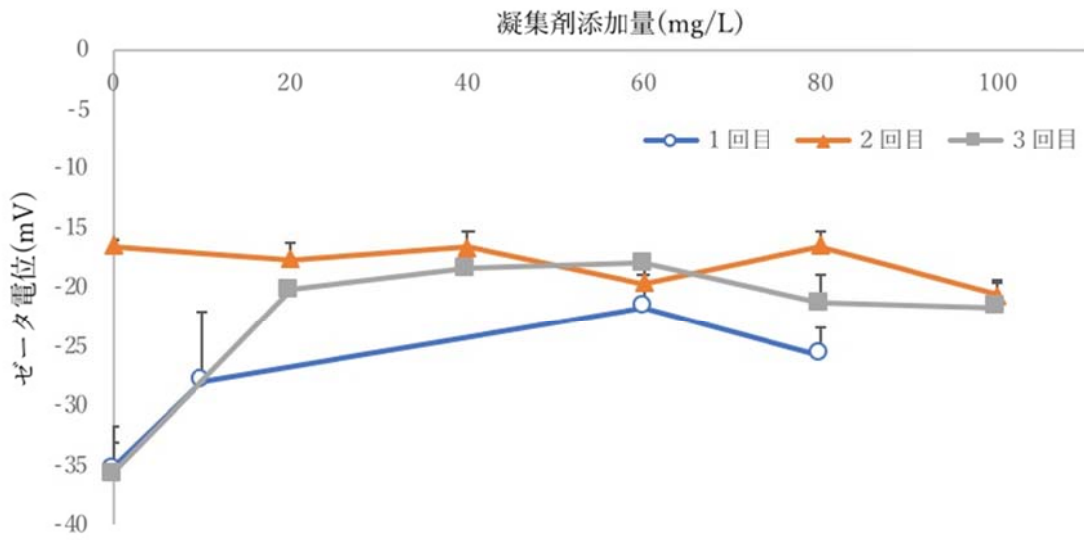


図-5 ピコ植物プランクトン懸濁液の凝集沈殿実験後の上澄水に残留する粒子のゼータ電位

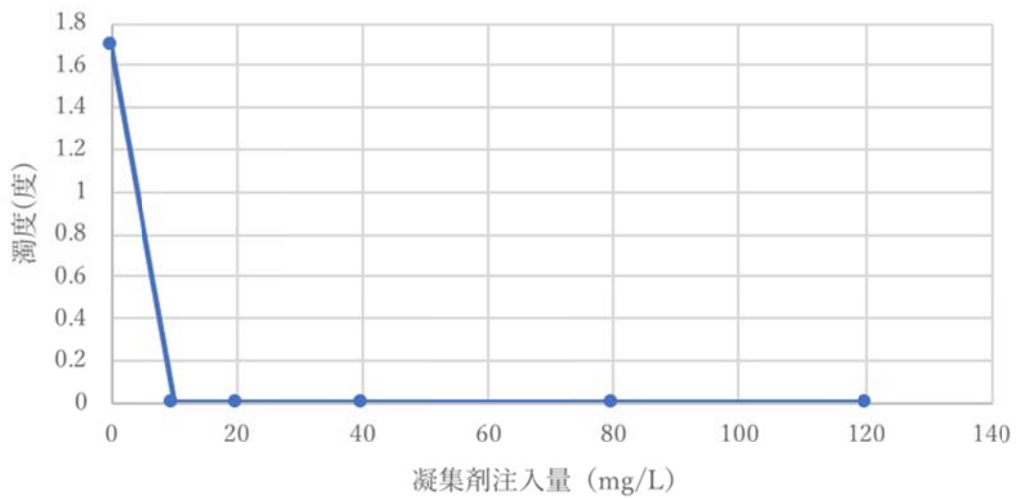


図-6 ポリスチレン系粒子懸濁液における凝集剤添加量に対する濁度変化

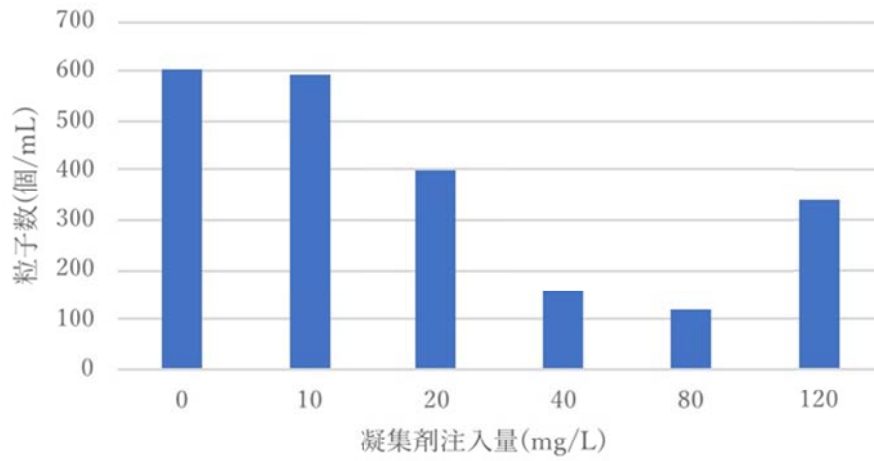


図-7 ポリスチレン系粒子懸濁液における凝集剤添加量に対する総粒子数の変化

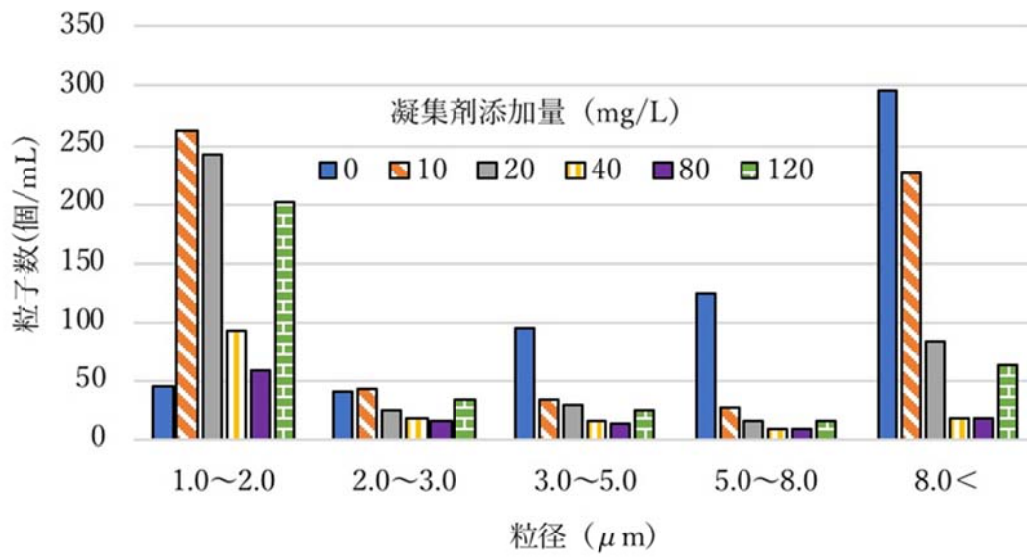


図-8 ポリスチレン系粒子懸濁液における粒径毎の粒子数の凝集剤添加量に対する変化

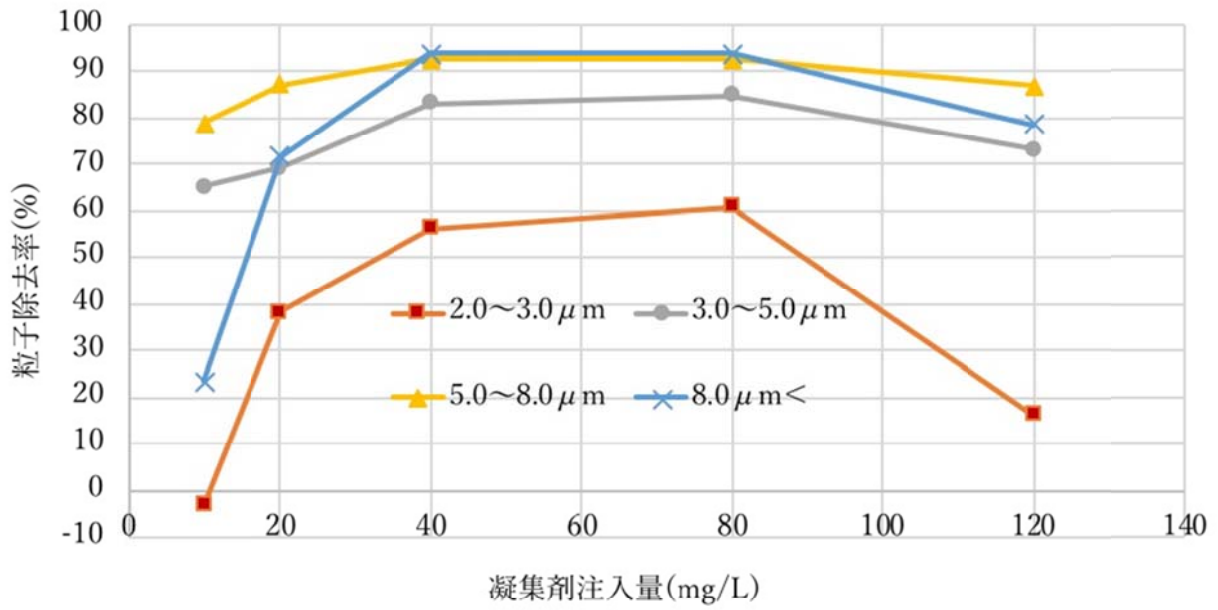


図-9 ポリスチレン系粒子懸濁液における凝集剤添加量に対する粒径毎の粒子除去率

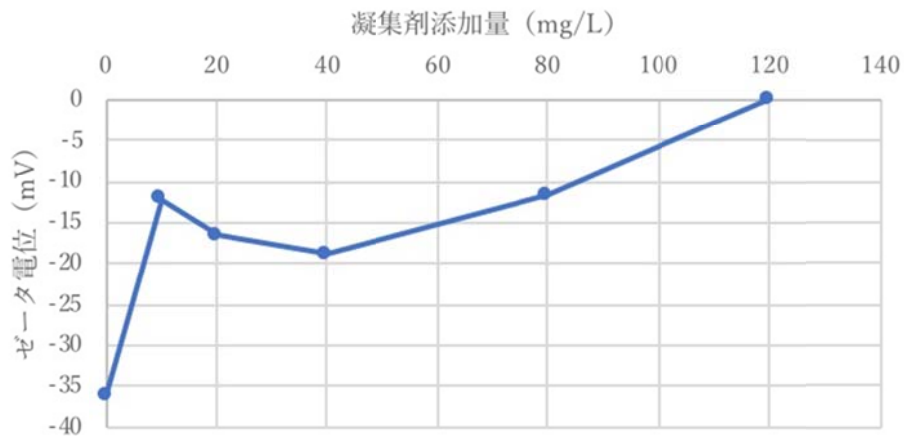


図-10 ポリスチレン系粒子懸濁液の凝集沈殿実験後の上澄水に残留する粒子のゼータ電位

分担研究報告書 2

大規模災害および気候変動の 水道原水水質への影響と対応策

研究分担者 柳橋 泰生

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）

「大規模災害および気候変動に伴う利水障害に対応した

環境調和型水道システムの構築に関する研究」

分担研究報告書

研究課題：大規模災害および気候変動の水道原水水質への影響と対応策

研究分担者 柳橋 泰生 福岡大学工学部 教授

研究要旨

大規模災害および気候変動に伴う利水障害として、水害による水道原水の濁度上昇に着目し、ダム貯水池および水道システムへの影響を解析し、対応策を検討した。

まず、水資源機構が管理しているダム貯水池の濁水長期化についてデータを整理した結果、ダム貯水池により大きな差があり、中には濁水が年間で 251 日間に及んだダム貯水池があることがわかった。

また、平成 12 年度から平成 27 年度までの水道統計における全国の浄水場の原水濁度の最高値の傾向を解析した。16 年間の経年変化として、原水濁度の最高値が高かった浄水場数の増加傾向は認められなかった。平成 13 年度は、高濁度となった浄水場数が多く、平成 20 年度および平成 21 年度は少なかった。16 年間で原水濁度の年間最高値が 500 度以上になったのが 1 年のみであった浄水場が半数を占めたが、4 年以上年間最高値が 500 度以上になった浄水場が 18 施設あった。18 施設のうち、8 施設が北海道、5 施設が関東地方の浄水場であった。

平成 29 年 7 月に発生した九州北部豪雨について、水道原水の濁度上昇の状況および水道事業体の対応について調査を行った。水道事業体の取水地点が存在する久留米市の降水量は 100mm/日程度であったが、上流部では局地的に 500mm/日以上の降水量が観測され、筑後川の水位が上昇し、従来にないほど原水濁度が増加した（最高 7,600 度）。水道事業体では、PAC 注入率の増量、別水源の活用等により対応し、浄水の濁度の上昇等を回避することができた。原水濁度や上流地域の降水量の監視、近隣水道事業体、関係機関との情報交換、代替水源の有効性等が確認された。

A. 研究目的

平成 19 年 6 月、降雨による泥流の流入により北海道の水道において原水濁度が 15,133 度に達し、長時間の断水事故を引き起こした。大規模災害および気候変動に伴う利水障害としては、豪雨の増加による水

道原水の濁度の上昇が懸念される。気象庁によると、わが国において昭和 50（1975）年から平成 28（2016）年の 42 年間に 1 時間に 50mm 以上、80mm 以上の降水の年間発生回数が有意に増加している（図 1、図 2）。なお、水害統計調査によると明治以降の水

害被害額は増加傾向にあるとはいえず（図3）、水害防止施設の整備等の効果を示唆している。

水道原水の濁度の中長期的な傾向を把握し、今後の大規模災害および気候変動に備える基礎的知見を得るため、ダム貯水池における濁水長期化の発生状況を把握するとともに、水道原水の濁度に関するデータ量が豊富な水道統計を用いて経年変化を解析した。その際、近年において原水に高濁度が発生した水道事業体から当時の状況を聴取し、高濁度の原因等を調査した。また、平成29年7月に発生した九州北部豪雨の際の降水量や水道原水の濁度のデータを整理するとともに、当該地域の水道事業体に対してヒアリング調査等を行い、高濁度時の対応についてとりまとめた。

その結果に基づき、大規模災害や気候変動に対する水供給システムの適応性指標を考案するとともに、大規模災害や気候変動に伴う利水障害に対応した環境調和型の水供給システムの構築について具体策を検討した。

B. 研究方法

(1) ダム貯水池における濁水長期化の発生状況

独立行政法人水資源機構が管理しているダム貯水池のうち平成15年以降のデータが公表されている13施設について、水質年報¹⁾に基づき、濁水長期化の発生状況を整理し、経年変化を把握した。

(2) 水道統計における原水濁度の経年変化の解析

日本水道協会の水道統計（水質編）²⁾は平成12年度以降のデータについて電子化さ

れている。平成12年度から最新版の平成27年度の16年間の水道事業体の原水濁度のデータの経年変化を解析した。平常時の原水濁度は低いため、各事業体の年度毎の最高値に着目した。水道統計では、年間における最高値は記載されているが、年間における2番目以下のデータは不明である。また、水道事業体毎に年間の測定回数に違いがあり、毎日測定を行っている水道事業体もあれば、年数回というところもある。濁度が高くなると計器の測定上限を超えてしまい、実際はさらに高濁度となっているにもかかわらず、測定されていない場合もある。そのような制約があり、データを解釈する場合に留意が必要であるが、全体的な傾向を把握することは可能と考えられる。

(3) 高濁度となった個別事例の状況

水道統計では、各年度において原水濁度が最高値を記録した日時は記載されていない。このため、近年において1,000度以上の高濁度が発生したいくつかの浄水場について水道事業体から、最高値を記録した日時、可能な場合は、浄水場近辺の降水量の記録、高濁度となった原因等について聴取した。

(4) 九州北部豪雨の状況

平成29年7月5日から6日にかけて、九州北部地域に局所的豪雨が発生し、筑後川の水位・流量が増大し、水道原水の濁度がこれまでにならぬほど上昇した。降水量、原水濁度、水道における対応状況等について整理した。

C. 研究結果

(1) ダム貯水池における濁水長期化の発生状況

独立行政法人水資源機構が管理しているダム貯水池のうち、平成 15 年から平成 27 年までの 13 年間のデータが水質年報に掲載されている 13 施設について、濁水長期化が始まった日から収束した日までの日数を計算し、当該年に濁水長期化が発生したダム貯水池の数および日数の合計を図 4 に示した。各年において濁水長期化が発生した施設数をみると、13 施設中、平成 16 年および平成 23 年に 6 施設と最も多くなっており、平成 23 年は濁水の日数の合計が 743 日（1 施設あたりの平均は 57 日）と最も長かった。この 13 年間では、濁水が発生した日数について経年変化に特定の傾向はみられなかった。

また、13 施設の中で、年間における濁水日数が最も長かった（251 日（平成 23 年））施設では、13 年間で濁水長期化がなかった年は 1 回のみで、13 年間の平均濁水日数は 107 日であった。逆に、13 施設の中で濁水長期化の発生が最も少なかった施設では、13 年間で 47 日（年平均 3.6 日）であり、施設により濁水長期化の発生の状況は大きく異なることがわかった。

(2) 水道統計における原水濁度の経年変化の解析

平成 12 年度から平成 27 年度において水道原水の濁度が測定され、水道統計にデータが掲載されている各年度の浄水場の数を表 1 に示す。また、各年度における浄水場の原水濁度（年間最高値）の分布状況は表 1 および図 5 のとおりである。原水濁度（年間最高値）が 100 度以上となる浄水場は、各年度とも、原水濁度が測定された浄水場の概ね 2%程度であった。原水濁度（年間最高値）が 1,000 度以上の浄水場の数のみ

を抽出すると図 6 のとおりとなる。平成 13 年度において原水濁度（年間最高値）が 1,000 度以上となった浄水場が 13 施設と多く、平成 20 年度および平成 21 年度はなかった。

原水濁度（年間最高値）が 500 度以上、1,000 度以上、2,000 度以上となった年度の回数別に浄水場数を集計した（表 2）。16 年間で一度でも 500 度以上となった浄水場は 117 施設、1,000 度以上は 38 施設、2,000 度以上は 12 施設であった。500 度以上となった 117 施設について都道府県別の浄水場数を示したのが図 7 である。北海道、関東、信越地方に多いことがわかる。また、各年度別に示したのが図 8 である。

表 2 に示すように、原水濁度（年間最高値）が 500 度以上となった 117 施設のうち、約半数に相当する 58 施設は 16 年間で原水濁度（年間最高値）が 500 度以上となったのは 1 回のみであった。3 回までが 99 施設（85%）を占めた。16 年間で 1 回のみ原水濁度の年間最高値が 500 度以上となった浄水場の数を都道府県別に示したのが図 9 である。北海道、関東のほか近畿、中国・四国地方も多くなっている。2 回以上原水濁度（年間最高値）が 500 度以上となった浄水場の数を都道府県別に示したのが図 10 であり、北海道、関東、信越地方に集中していることがわかる。

他方、原水濁度（年間最高値）が 500 度以上となった年が 16 年間で 4 回以上あった浄水場は全国で 18 箇所あり、それらの施設の各年度の原水濁度（年間最高値）を表 3 に示した。18 施設のうち 8 施設が北海道、5 施設が関東地方の浄水場であった。16 年間で 2,000 度以上の原水濁度（年間最高値）

を記録した12施設うちの8施設が表3に示した施設に含まれる。2,000度以上を記録した他の4施設は、北海道(2施設)、関東地方(1施設)、および中部地方(1施設)に位置する。

(3)高濁度となった個別事例の状況

ア. 北海道・A事業体

平成26年9月16日15時から21時に原水濁度が2,000度以上(濁度計の測定上限が2,000度)を記録した。9月16日の浄水場付近の降水量は0~3mm/h(日降水量5mm/d)であったが、浄水場取水口近くに流れ込んでいる小河川の上流の傾斜地に農地が広がっており、そこに局地的に降雨があり濁水が流入したものと思われる。15時から19時30分まで取水を停止した。なお、9月16日の13時の原水濁度は3度、14時は86度であり、その後急激な濁度の上昇がみられた。また、22時は225度、23時は167度、24時は81度と低下した。

この浄水場において平成26年度以降の原水濁度の上昇事案としては、平成26年8月5日に1,140度(最高値、以下同様。)、9月22日に1,258度、平成27年8月12日に990度、平成28年8月1日に1,522度、8月20日に966度を記録した。

イ. 北海道・B事業体

16年間で原水濁度(年間最高値)が1,000度以上となった年が8回あった。原水が高濁度となる原因については、融雪出水や台風・前線による降雨等に伴い取水地点の上流にある発電用ダムからの放流水が増加し、濁水が発生していると考えられる。

ウ. 北海道・C事業体

浄水場取水口5~6km上流に発電用水量調整ダムがあり、降雨時等にダム放流が増

加し、原水濁度が激しく変動する傾向にある。近年において原水濁度が高くなった事案は次のとおりである。

平成22年9月6日 前線による局地的大雨
原水濁度最高値 20時 2,540度

平成23年9月2日 上流域大雨
原水濁度最高値 17時 2,530度

平成27年8月1日 前線による上流域大雨
原水濁度最高値 6時 2,000度

平成28年8月18日
台風7号による上流域大雨
原水濁度最高値 2時 4,800度

平成28年8月21日
台風7号、低気圧による上流域大雨
原水濁度最高値 4時 2,100度

平成28年8月23日
低気圧、台風9号による上流域大雨
原水濁度最高値 13時 2,600度

エ. 新潟県・D事業体

平成16年7月13日および平成23年7月30日(13時)に原水濁度2,000度を記録した。平成16年7月新潟・福島豪雨、平成23年7月新潟・福島豪雨の際、浄水場上流部に豪雨があり、土砂災害等が発生したことが原因と考えられる。平成16年には上流部の河川の氾濫も発生した。平成16年は新潟県内で日降水量421mm、平成23年は新潟県の多いところでは豪雨の期間に600mmを超える降水量を記録した。

オ. 富山県・E事業体

平成17年8月16日8時に、原水濁度5,000度を記録した。降雨により上流河川の斜面が崩落し濁流となったことが原因と考えられる。当日の原水濁度は、7時20分に200度であったが、7時30分には2,000度(連続監視装置の測定上限)を超え、8時に約

5,000 度（職員が希釈操作により測定）となった。10 時には 1,890 度となり、13 時に 979 度、15 時に 506 度、翌日の 8 時に 70 度となった。

カ．長野県・F 事業体

平成 18 年 7 月に、原水濁度が 3,630 度となった。7 月の平均は 285 度であった。平成 18 年 7 月中旬、長野県各地で豪雨災害が起き、浄水場の取水口上流部でも 17 日に土砂崩れがあった模様で、当時の対応記録等から、3,630 度を観測したのは 7 月 17 日から 19 日と推察される。高濁度の原因は、取水口上流で土砂崩れが発生し水源河川へ流入したこと等が考えられる。

キ．高濁度の原因

高濁度となった個別事案の状況から、高濁度の原因としては次のことが考えられる。

- ① 原水が高濁度となる原因は、基本的には、上流域の降雨による濁質の流入である。
- ② 降雨強度が強くなり、がけ崩れ、河川の氾濫等により土砂の流入量が増加すると、濁度の程度が上昇する傾向にある。
- ③ 浄水場の所在地で降雨がない場合でも、集水域で降雨があり、土砂が流出すると濁度が上昇する。降雨の観測ネットワークで把握できない局地的降雨により土砂が流出し高濁度となった場合もある。
- ④ 降雨の際、浄水場取水口の上流部に湛水能力の低いダムがあると、放流量が増加し原水濁度が上昇する。

(4)九州北部豪雨の状況

ア．降雨の状況

気象庁の発表³⁾によると、平成 29 年 7 月

5 日から 6 日にかけて、対馬海峡付近に停滞した梅雨前線に向かって暖かく非常に湿った空気が流れ込んだ影響等により、線状降水帯が形成・維持され、同じ場所に猛烈な雨を継続して降らせたことから、九州北部地方で記録的な大雨となった。九州北部地方では、7 月 5 日から 6 日までの総降水量が多いところで 500mm を超え、7 月の月降水量平年値を超える大雨となったところがあった。また、福岡県朝倉市や大分県日田市等で 24 時間降水量の値が観測史上 1 位の値を更新するなど、これまでの観測記録を更新する大雨となった。7 月 5 日から 6 日の 48 時間の降水量の分布を図 11 に示す。

また、平成 29 年 7 月の九州北部豪雨があった地域における国土交通省設置の主要雨量観測所の位置（図 12）および豪雨が始まった平成 29 年 7 月 5 日 10 時から 24 時間の雨量を図 13 に示す。福岡県と大分県の県境付近の鶴河内では 24 時間雨量が 498mm 以上（2 時間分欠測）に達した。雨量のピークは、角枝（朝倉市、寺内ダム付近）で 5 日 15 時頃、鶴河内で 5 日 14 時頃であった。

イ．河川水位の状況

九州北部豪雨があった地域における国土交通省設置の主要水位観測所の位置（図 12）および平成 29 年 7 月 5 日から 7 日の水位を図 14 に示す。荒瀬（福岡県うきは市）は筑後川河口から 62.08km、片ノ瀬（福岡県久留米市）は 40.61km、瀬ノ下（福岡県久留米市）は 25.52km に位置する。各地点における水位をみると、荒瀬は 7 月 5 日 21 時に 7.22m、片ノ瀬は 7 月 5 日 23 時に 10.19m、瀬ノ下は 7 月 6 日 0 時に 5.66m とピークに達している。

ウ．水道の原水濁度

筑後川中流域で筑後川から取水している4つの水道について原水（河川水）の濁度のデータを整理した。上流からa事業体の取水口（筑後川河口から約34kmの左岸）、b事業体の取水口（約28kmの左岸）、c事業体の取水口（約28kmの右岸）、d事業体の取水口（約24kmの右岸）がある。筑後川河口から23kmの地点に筑後大堰があり、約29km地点までが湛水域である。

平成29年7月5日12時から7月7日0時までのデータを図15に示す。a事業体では、7月5日20時43分から7月6日7時30分までのデータは、手分析によるものである。b事業体およびc事業体の機器の測定上限が2,000度であり、それを超えた場合は手分析により測定した。d事業体も上限が1,000度であるため、それを超えた場合は手分析により測定を行い、7月5日21:16に1700.0度、6日9:00に1632.2度、7日9:00に311.6度を記録している。

a事業体の原水濁度は、7月6日1時に3,504度、b事業体は7月6日2時に7,600度とピークに達している。

エ. 原水濁度の上昇への対応

b事業体およびc事業体に原水濁度の上昇時の対応を聴取した結果は次のとおりである。

<b事業体>

原水濁度が7,600度になったのは初めてである。取水停止には至らなかった。計器の測定上限は2,000度なので、それ以上は手作業で希釈し測定した。濁度が200度になるとジャーテストを行うこととしている。以前から原水のアルミニウム濃度が高かったことから、平成25年度から高塩基性PACを採用している。通常時、採用前はPAC注

入率が25mg/L程度であったが、採用後15~20mg/L程度になっていた。今回の高濁度事案においてPAC注入率は最高で70mg/Lであった。筑後川表流水のほか、地下水水源を持っており、高濁度時、活用することができた。九州北部豪雨では流木が多く発生したが、河川を流れ下る流木は河川水位が高かったため、水道原水の取水口に影響を与えることはなかった。

<c事業体>

渴水対策用の原水調整池を有しており、河川が高濁度になった際は、管理している機関との調整は必要であるが、調整池から濁りのない原水を取水することができ、ろ過水濁度を0.02度以下に抑えることができた。ただし、調整池の導水管内の滞留水の臭味対策として粉末活性炭の注入は必要となった。

D. 考察

(1) 高濁度の地域差の原因

取水している河川上流域における降雨に起因する土砂の流出や底泥の巻き上げが原水の高濁度の原因と考えられるが、地域により差異がみられる。水道原水の濁度が高くなった浄水場は、北海道、関東、信越地方に多くみられたため、地域差が出る原因について考察した。

まず、降雨による土壌侵食を起こす要因に地域差があることが考えられる。神山ら⁴⁾は、土壌侵食量推定のため米国農務省が開発したUSLEを用いて、次式に示すパラメータを1kmメッシュ単位で整備し、土壌侵食量Aを推定した。

$$A=(R+Rc) \times K \times LS \times C \times P$$

A : 土壌侵食量 (t ha⁻¹ y⁻¹)

- R：降雨係数
- Re：降雨係数の積雪による補正值
- K：土壌係数
- LS：地形係数
- C：作物係数
- P：保全係数（1.0に固定）

その結果、降雨係数（昭和 63 年～平成 17 年の平均）は西日本太平洋側で大きく北海道で小さい値を示し、土壌係数は近畿、中国地域で高い傾向にあった。また、これらのパラメータの積である土壌侵食量の大きなメッシュは、東海、四国、九州西部、沖縄に多く分布したと報告している。すなわち、C(2)で報告した水道原水の濁度が高い浄水場がある地域と USLE を用いて土壌侵食量が多いと推定された地域とは異なる場合が多かった。

その理由としては、降雨データについては年次が一致しない期間があり、その影響があると考えられた。しかしながら、土壌係数等は年次により大きな変化があるとは考えられず、水道原水の濁度が高くなる現象が降雨による土壌侵食の増加だけでなく、USLE で考慮されていない要因（例えば、豪雨によるがけ崩れ、洪水調節機能のないダムの影響など）が関与している可能性を示唆した。

(2) 高濁度の対応策

水道原水の濁度が高くなった場合の対応策について考察した。

まず、原水の濁度を監視することが基本になると考えられる。導水管が長いような場合は、取水施設において原水の濁度を監視すると、浄水場での対応を準備するための時間的余裕ができる。原水の調整池があるような場合は、高濁度の原水の取水を減

小さく、清浄な調整池の水を利用することができる。高頻度で原水の濁度が高くなる浄水場では、高濁度となるパターンが定型化している傾向にあることから、監視項目・監視ポイントを決めて対処することができる。浄水場近辺では降雨が少ないにもかかわらず、原水濁度が非常に高くなる場合もあり、上流の豪雨を監視する体制をとることが必要である。降雨の監視ネットワークでは把握できないこともあるため、浄水場の原水の監視が第一義的に重要であるといえる。高塩基性 PAC の使用により原水が高濁度となった際に、薬剤が比較的少量の投入で対応することができたことから他の水道事業者でも採用の検討に値するものと考えられる。高濁度が頻繁に発生する水道では、職員に対応力があると考えられるが、頻度が少ない水道では、突然の原水水質の変化に対応できない可能性があることから、想定される事態のシミュレーション、マニュアルの整備、職員の訓練等に努める必要がある。

(3) 大規模災害や気候変動に対する水供給システムの適応性指標

水害対応を考慮すると、適応性指標としては、次の項目が適当と考えられる。

【施設の適応力】

- ① 浄水場の能力
- ② 代替水源の能力
- ③ 水源水質の監視能力
- ④ 治水・治山の施設整備状況

【情報ネットワークによる適応力】

- ⑤ 上下流の水道事業者との連携力
- ⑥ 河川管理機関、水源管理機関、気象管理機関、他の利水者との連携力

【職員の技能による適応力】

- ⑦ 職員の技術力
- ⑧ 内部・外部研修の実施状況
- ⑨ 研究能力

【万全な準備による適応力】

- ⑩ シミュレーションの実施状況
 - ⑪ 危機管理マニュアルの整備状況
 - ⑫ 訓練の実施状況
- (4)大規模災害や気候変動に伴う利水障害に対応した環境調和型の水供給システムの構築

水害対応を考慮すると、環境調和型の水供給システムとしては、次の条件を備えることが適当と考えられる。

- ① 外部の変化に対応し得る強靱な施設能力を持つこと。

地下水水源、原水調整池、海水淡水化等の代替水源を有していると望ましい。また、広域水道の場合は広域の水運用を行うことができる。さらに、浄水施設の能力が高い場合は、悪化した原水水質の水処理を適切に行うことができる。

- ② 外部の状況の変化を把握する監視能力を持つこと

監視機器の整備、他機関との情報ネットワークの構築により、外部の状況の変化を正確に把握し対応することができる。

- ③ 迅速で適切な対応を行うことができる組織力を持つこと

組織内外の意思疎通が円滑で、適切な意思決定を迅速に行うことができる。

E. 結論

水道原水となる河川水の濁度について、最も情報量が豊富と考えられる水道統計について可能な解析を行い、高濁度となる原因、地域差などを一定程度解明することが

できた。また、平成 29 年 7 月に発生した九州北部豪雨に関して関係水道事業体から情報を提供してもらい、対応状況等を整理することができた。これらにより、大規模災害や気候変動に対する水供給システムの適応性指標や大規模災害や気候変動に伴う利水障害に対応した環境調和型の水供給システムの条件を示すことができた。

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

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) 独立行政法人水資源機構：水質年報、平成 15 年～平成 27 年.

- 2) 日本水道協会：水道統計（水質編）、平成 12 年度～平成 27 年度.

- 3) 気象庁：平成 29 年 7 月九州北部豪雨について、平成 29 年 7 月 19 日.

- 4) 神山和則、谷山一郎、大倉利明、中井信：土壌侵食量推定のための 1km メッシュデー

タの作成、インベントリー、10、pp. 3-9、
2012.

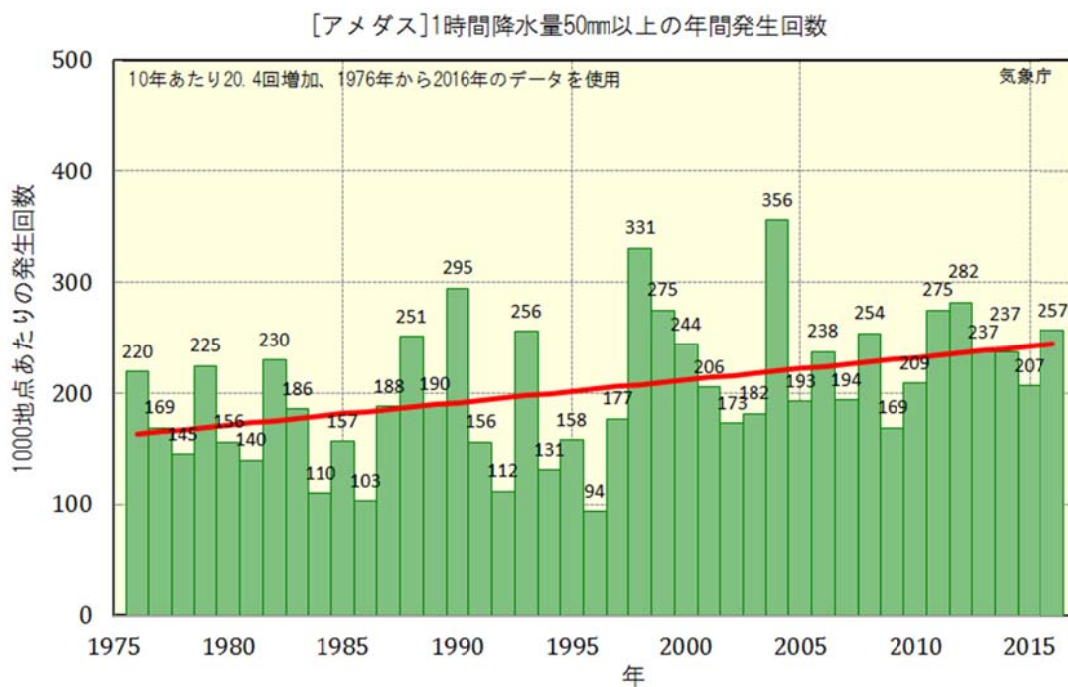


図1. 1時間降水量50mm以上の年間発生回数

(出典：気象庁ホームページ)

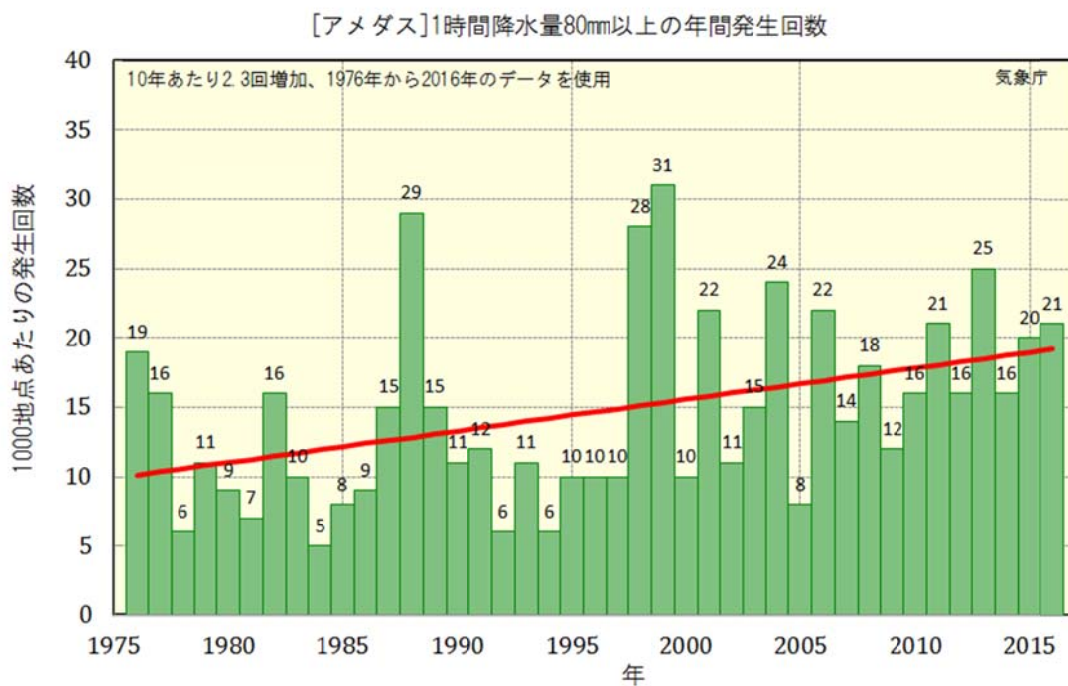


図 2. 1 時間降水量 80mm 以上の年間発生回数

(出典：気象庁ホームページ)

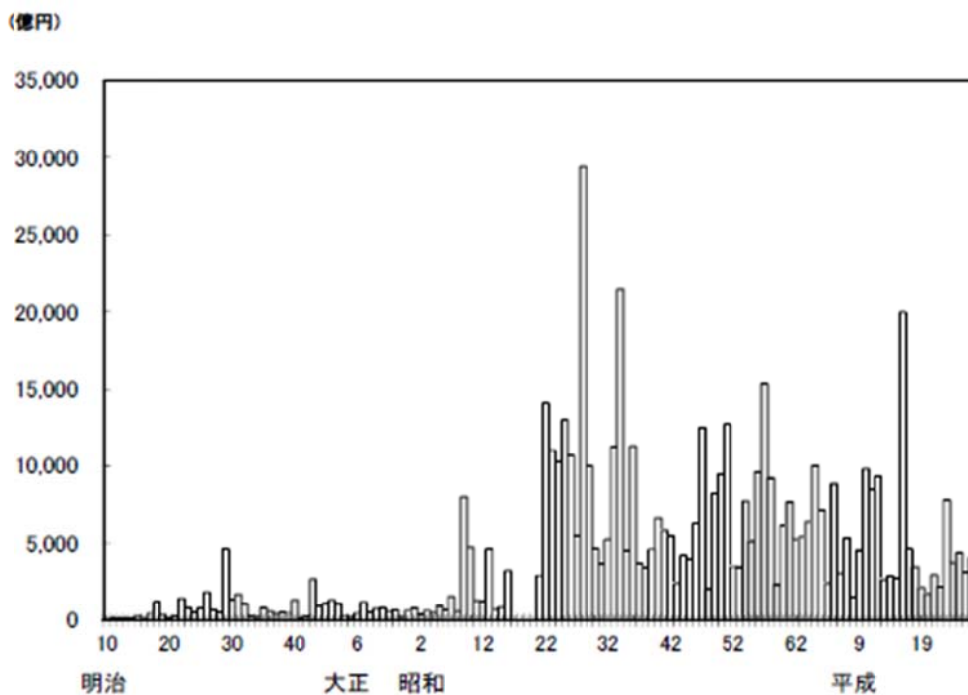


図-13 明治以降の水害被害額の推移(平成17年価格)

図 3. 明治以降の水害被害額の推移 (平成 17 年価格)

(出典：平成 27 年水害統計調査)

注) 昭和 20 年枕崎台風、昭和 22 年カスリーン台風、昭和 23 年アイオン台風、昭和 25 年ジェーン台風、昭和 26 年ルース台風、昭和 28 年梅雨前線・南紀豪雨、昭和 29 年洞爺丸台風、昭和 32 年諫早豪雨、昭和 33 年狩野川台風、昭和 34 年伊勢湾台風、平成 16 年福井豪雨・台風 16 号・台風 18 号・台風 23 号



図4. 水資源機構管理ダムにおいて濁水が発生したダムの数と合計日数の経年変化
表1. 原水濁度を測定・報告した浄水場数および濁度（年間最高値）別の浄水場数

年度	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
全浄水場数	5,223	5,193	5,165	5,281	1,865	5,278	5,315	5,357	5,195	5,248	5,356	5,362	5,405	5,414	5,484	5,578
2000度以上の浄水場数	2	3	2	0	1	1	2	1	0	0	1	1	1	0	1	1
1000度以上2000度未満の浄水場数	5	10	3	1	2	2	3	3	0	0	4	5	1	2	2	1
500度以上1000度未満の浄水場数	14	37	13	6	13	5	12	21	8	3	8	14	9	15	6	11
200度以上500度未満の浄水場数	54	44	45	23	48	43	42	35	21	26	21	43	39	52	38	35
100度以上200度未満の浄水場数	53	49	57	66	65	51	45	40	37	43	45	51	46	60	53	36

(日本水道協会「水道統計」のデータより作成)

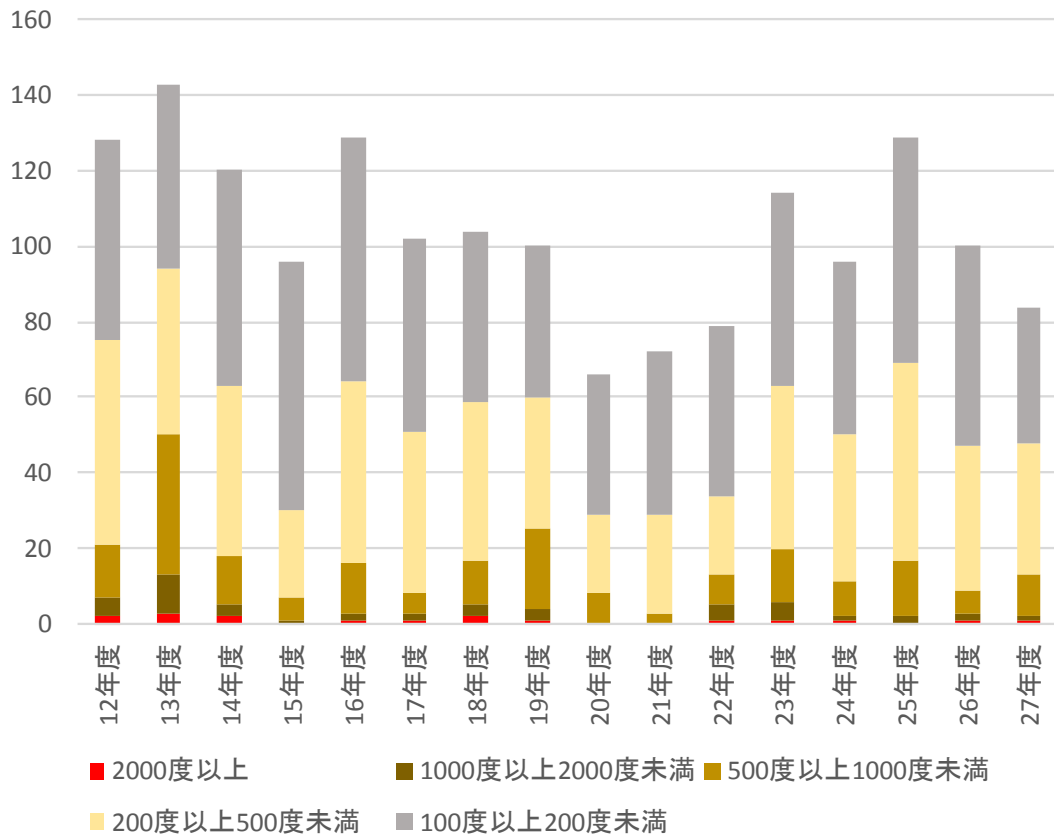


図5. 原水濁度の分布（浄水場数・年間最高値）（濁度100度以上）
（日本水道協会「水道統計」のデータより作成）

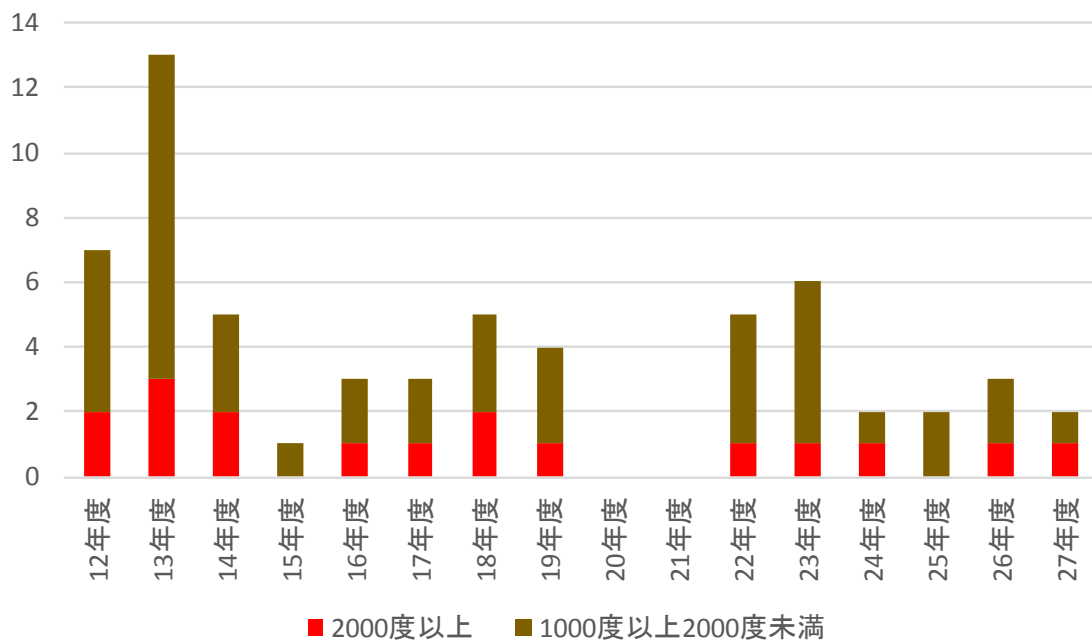


図 6. 原水濁度の分布（浄水場数・年間最高値）（濁度 1000 度以上）

（日本水道協会「水道統計」のデータより作成）

表 2. 原水濁度（年間最高値）が高くなった年度の数別の浄水場数
（平成 12 年度～平成 27 年度の間）

回数	原水濁度500度以上の年度の回数別の浄水場数		原水濁度1000度以上の年度の回数別の浄水場数		原水濁度2000度以上の年度の回数別の浄水場数	
	回数	%	回数	%	回数	%
1	58	50	26	68	8	67
2	23	20	9	24	3	25
3	18	15	1	3	1	8
4	7	6	0	0	0	0
5	7	6	0	0	0	0
6	0	0	1	3	0	0
7	2	2	0	0	0	0
8	0	0	1	3	0	0
10	1	1	0	0	0	0
13	1	1	0	0	0	0
計	117	100	38	100	12	100

（日本水道協会「水道統計」のデータより作成）

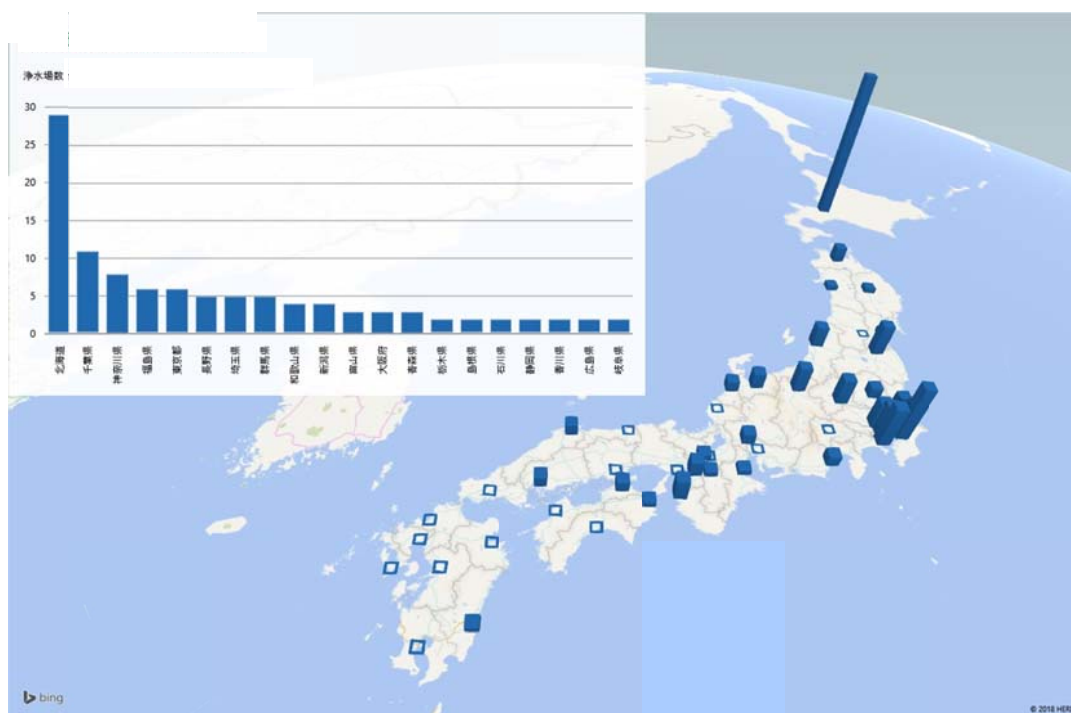


図 7. 平成 12 年度から平成 27 年度の間（16 年間）において 1 回でも原水濁度の年間最高値が 500 度以上となった浄水場の数（都道府県別）

注) 同じ浄水場が複数年で原水濁度が 500 度以上となった場合でも 1 として集計している。沖縄県は 500 度以上となった浄水場はない（図 8、図 9 および図 10 も同様）。

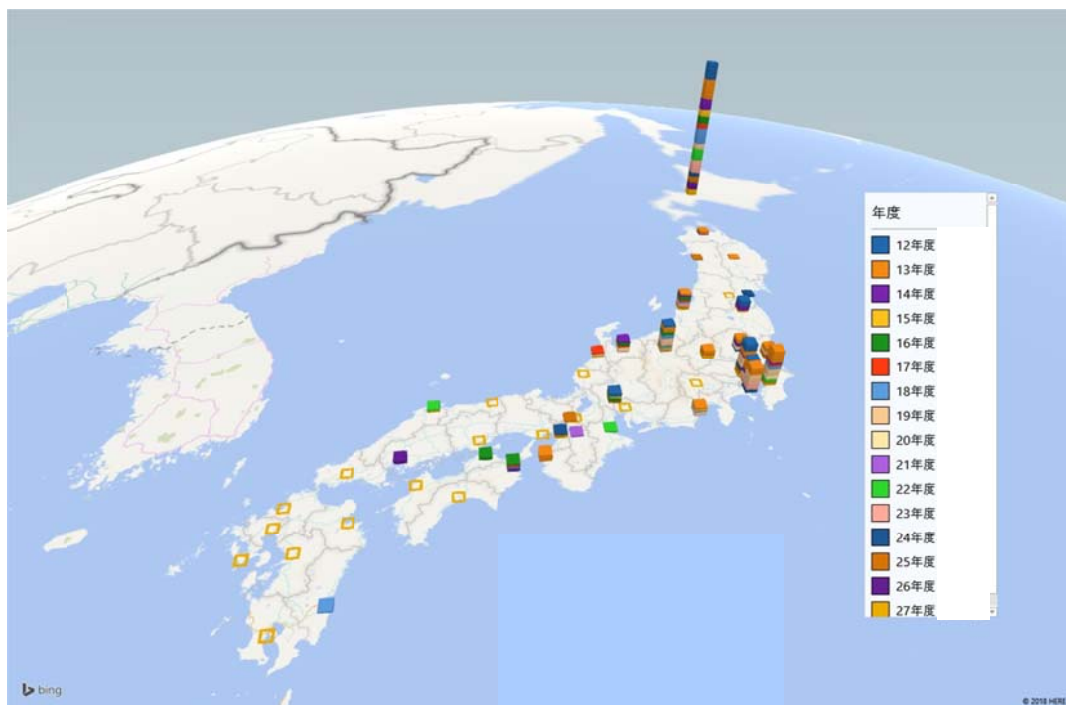


図 8. 原水濁度の年間最高値が 500 度以上となった浄水場の数の推移（都道府県別）

注) 年度毎の集計であるため、異なる年度では同じ浄水場が含まれている可能性がある。

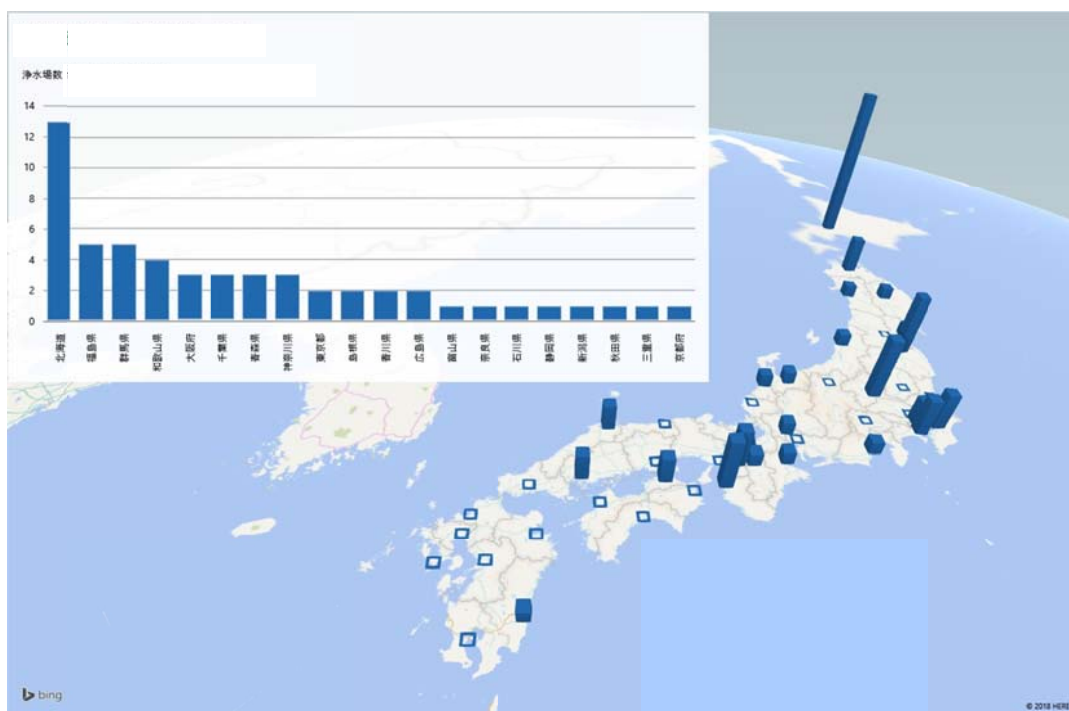


図9. 平成12年度から平成27年度の間（16年間）において1回のみ原水濁度の年間最高値が500度以上となった浄水場の数（都道府県別）

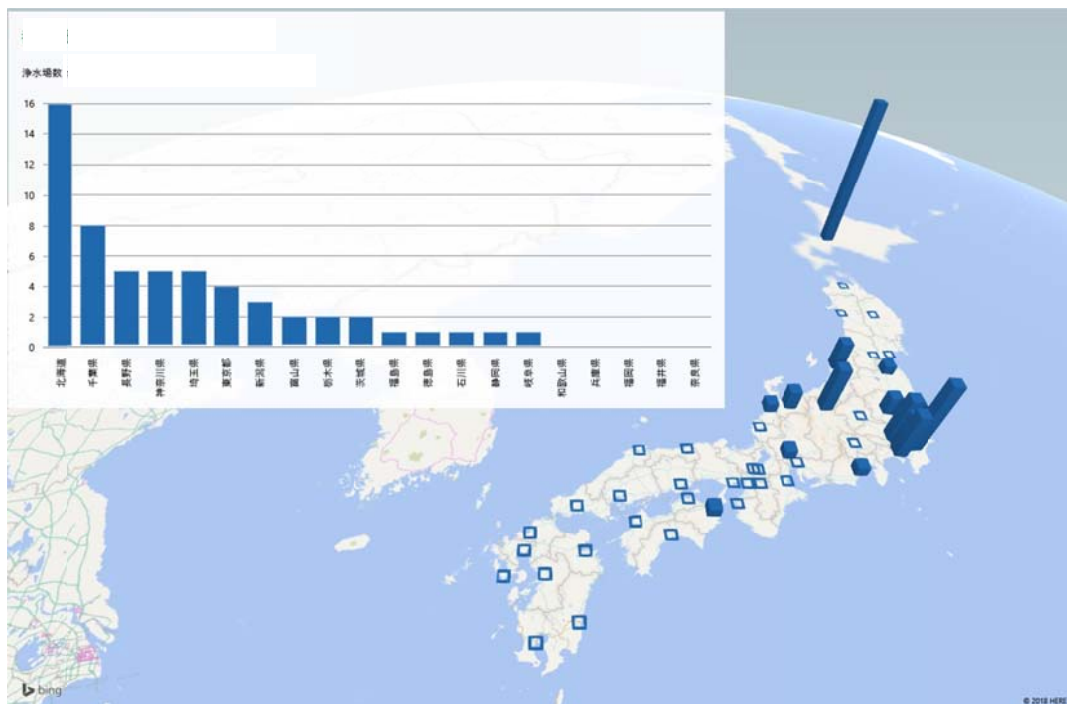


図10. 平成12年度から平成27年度の間（16年間）において2回以上原水濁度の年間最高値が500度以上となった浄水場の数（都道府県別）

表3. 原水濁度(年間最高値)が500度以上になった年が4回以上の浄水場における

原水濁度の推移

水源の水系	都道府県	12年度	13年度	14年度	15年度	16年度	17年度	18年度	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	24年度	25年度	26年度	27年度
石狩川水系	北海道	1733	1478	751	667	619	1623	1746	1018	70.4	216	1946	1387	2093	566.2	255	521
石狩川水系	北海道	850	1735	666	599.1	510.5	558	766.4	304.9	31	302.2	585	579.8	540.1	浄水受水		
石狩川水系	北海道	1200	2000	2000	1100	1200	220	230	150	54	85	860	1693	150	260	180	30
石狩川水系	北海道	140	310	130	69	33	76	980	51	28	29	1600	1100	180	500	380	110
石狩川水系	北海道	140	250	110	80	35	100	1100	52	37	30	920	810	160	350	840	130
常呂川水系	北海道	18.4	1290	680	600	763	630	826.8	999.9	208	425	117.1	183.2	208.4	194.5	28.1	186.8
湧別川水系	北海道	368	545	380	128.1	220	200	533	685	194	154	2540	12.8	25.3	41.5	2.6	2000
天塩川水系	北海道	210	291	330	288	98.3	462	192.1	105	105	192	1440	55.2	600	562	2000	990
荒川水系	埼玉県	580	1200	870	336	420	310	290	1600	240	230	270	460	540	410	350	280
荒川水系	埼玉県					稼働前	40	220	2100	280	83	180	850	1100	470	190	810
利根川水系	埼玉県	1100	670	320	130	140	150	190	510	350	240	240	360	320	850	270	620
利根川水系	東京都	500	840	630	110	360	290	270	500	190	120	150	360	130	290	89	290
利根川水系	栃木県	207	500	678.7	179.2	257.2	147.7	267.7	336.4	508.6	96.1	66.4	302	637.7	154	216.1	122
信濃川水系	新潟県				165	2000	500	570	300	100	119	120	2000	200	600	200	150
信濃川水系	長野県	77.1	175	57.4	51.5	591	143	3630	810	125.3	224.2	532.3	98.8	31.1	646.4	63.9	172.6
常願寺川水系	富山県	350	281	700	330	1210	5000	309	304	307	494	215	627	371	294	147	362.9
大井川水系	静岡県	400	832	302	426	238	143	512	330	591	254	142	1580	445	353	239	190
吉野川水系	徳島県	328	425	250	290	728	600	280	490	75.5	633	314	463.7	879	379	571	491

(日本水道協会「水道統計」のデータより作成)

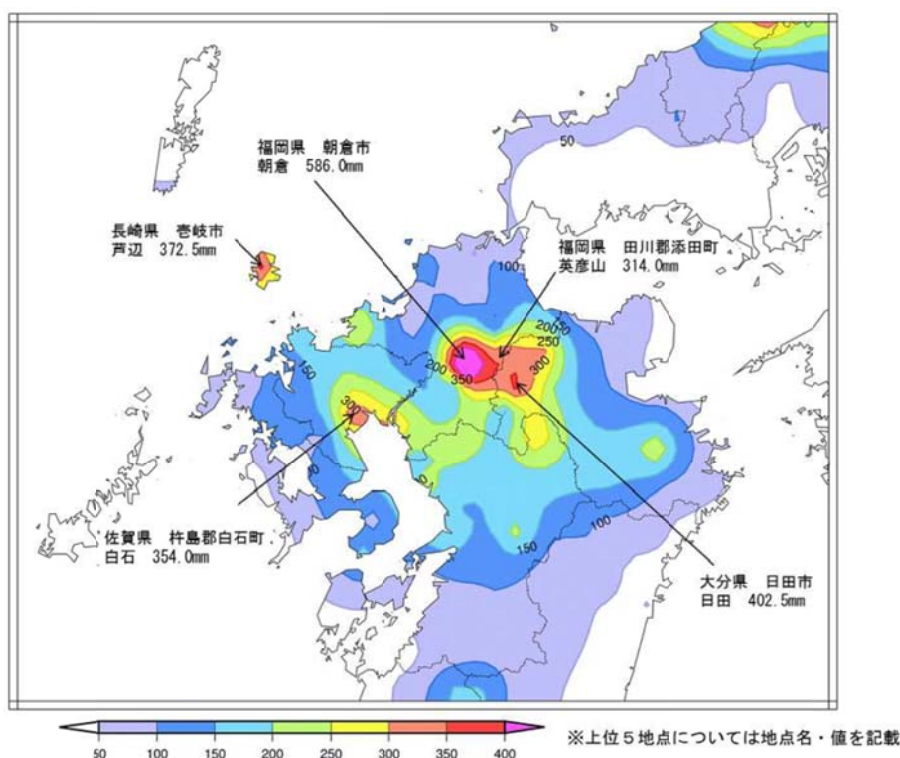


図 11. 平成 29 年 7 月 5 日から 6 日 (48 時間) の降水量の分布

(出典：気象庁 (平成 29 年 7 月 19 日) 発表資料)

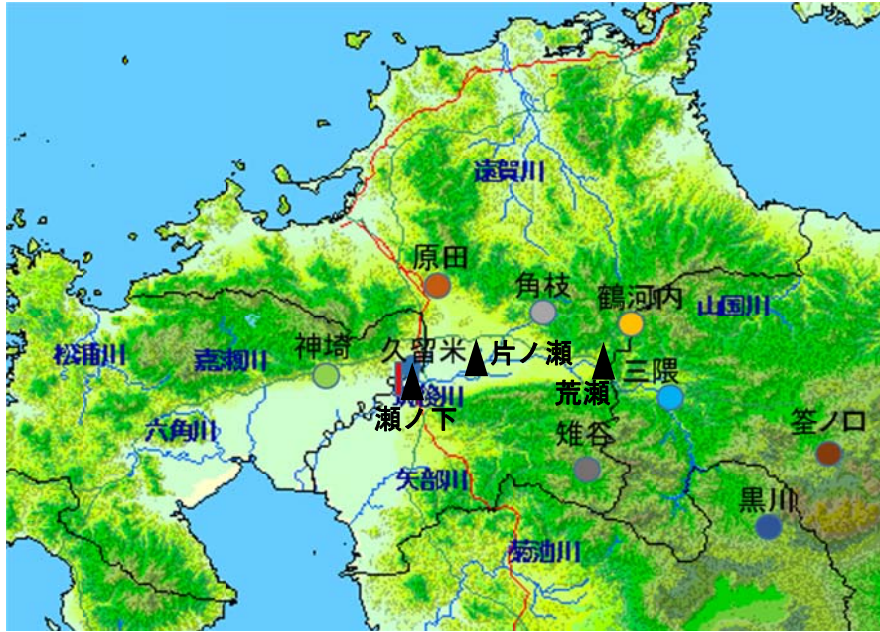


図 12. 国土交通省の主な雨量観測地点 (○印) ・河川水位観測地点 (△印)
(国土交通省「水文水質データベース」より)

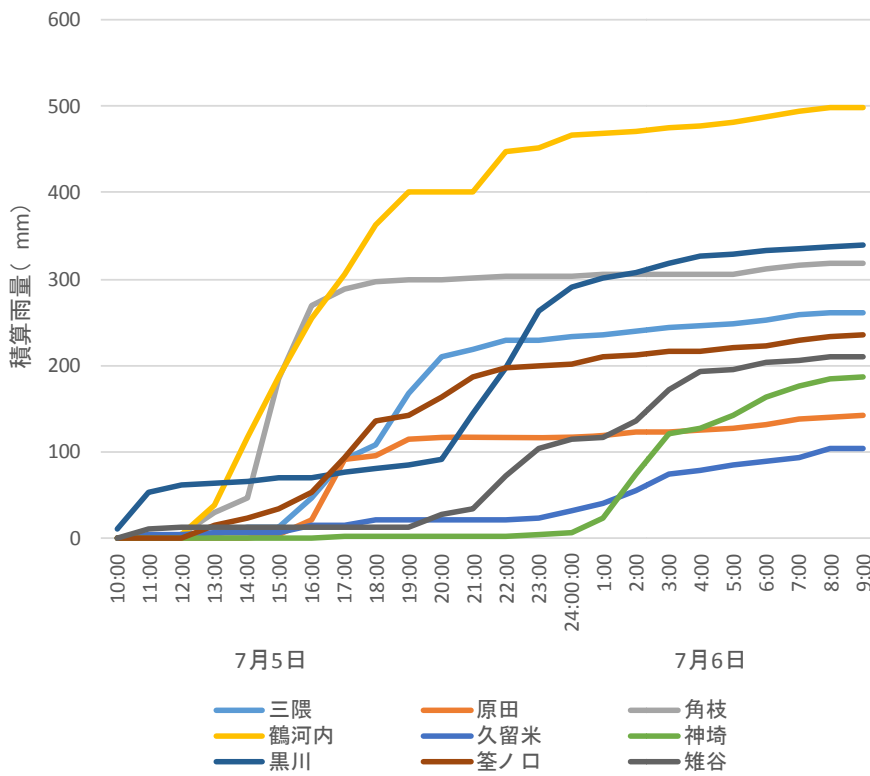


図 13. 平成 29 年 7 月 5 日 10 時から 24 時間の積算雨量
(国土交通省「水文水質データベース」より)

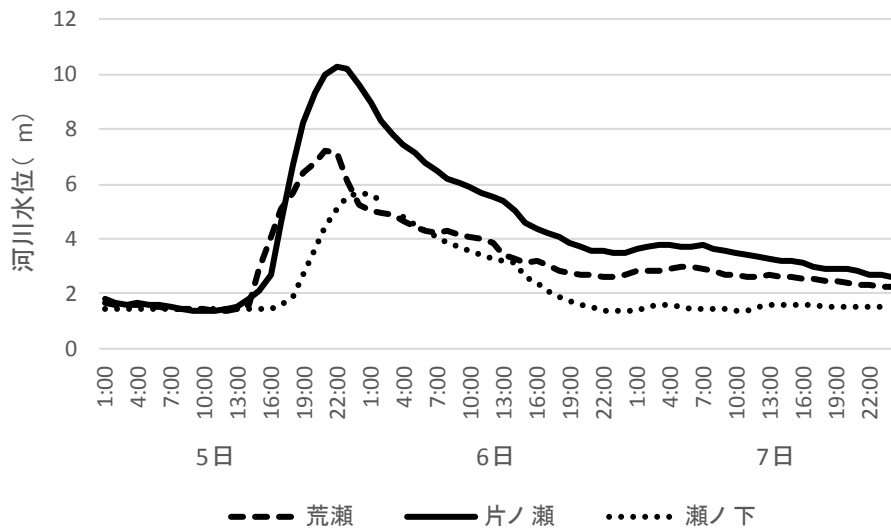


図 14. 筑後川の水位（平成 29 年 7 月 5 日～7 日）
（国土交通省「水文水質データベース」より）

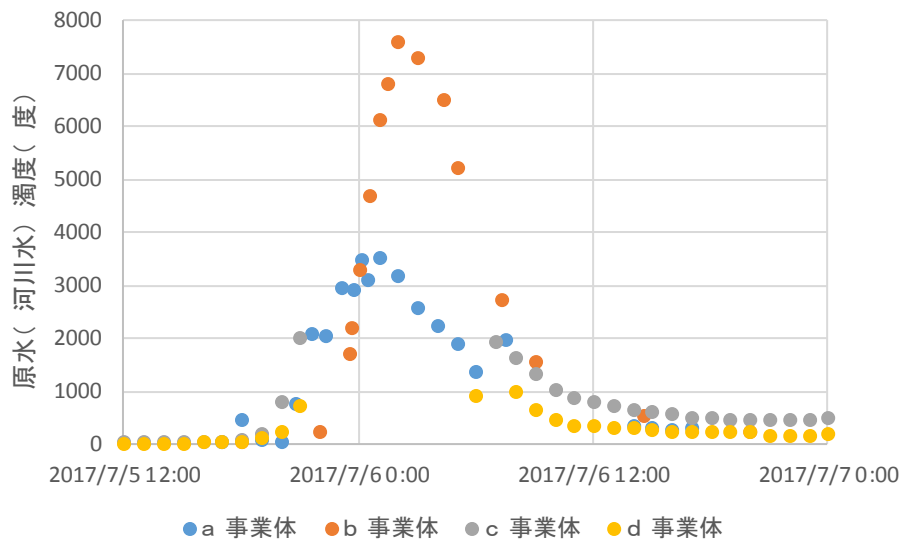


図 15. 筑後川中流域から取水している水道の原水（河川水）濁度

ろ過漏出障害原因微生物の同定技術
の開発と存在実態調査

研究代表者	秋葉	道宏
研究分担者	藤本	尚志
研究協力者	藤瀬	大輝

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)
「大規模災害および気候変動に伴う利水障害に対応した環境調和型水道システムの構築に関する研究」
分担研究報告書

研究課題：ろ過漏出障害原因微生物の同定技術の開発と存在実態調査

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 藤本 尚志 東京農業大学応用生物科学部醸造科学科 教授
研究協力者 藤瀬 大輝 川崎市上下水道局水管理センター水道水質課 担当係長

研究要旨

近年、浄水場においてピコ植物プランクトンに起因したろ過水濁度の上昇（ろ過漏出障害）が報告されている。これまでクローニング法といった分子生物学的手法により、ろ過漏出障害原因微生物について検討を行い、真核ピコ植物プランクトンでは緑藻綱の *Mychonastes* 属、ピコシアノバクテリアでは複数の系統の *Synechococcus* 属がろ過漏出障害の原因となることが明らかとなった。さらに、従属栄養性の微生物も濁度への影響が大きいことが明らかになってきた。これまで次世代シーケンサーにより川崎市上下水道局長沢浄水場処理工程水の真正細菌の生物相を評価し、本解析手法の有用性およびろ過漏出障害の原因生物について検討を行い、ろ過漏出障害原因微生物の評価法として本手法の有用性が示された。さらに沈澱処理水とろ過水の微生物相が大きく異なる傾向がみられ、ろ過水中の主要な微生物の種類が時期によって変化することが明らかとなった。そこで本研究では、16S rRNA 遺伝子アンプリコンシーケンシングの結果、長沢浄水場のろ過水で主要であった細菌が実際のダム湖においてどのような消長を示しているのか検討を行った。長沢浄水場ろ過水から 18 属が主要な細菌として検出された。*Flavobacterium* 属、*Sediminibacterium* 属、*Limnohabitans* 属、*Crenothrix* 属、*Methylocaldum* 属は宮ヶ瀬湖において総リード数に占める割合が 1% を超え、細菌群集における主要な構成細菌と考えられた。浄水場ろ過水における主要な細菌の実湖沼における分布は、表層に分布するもの、中層・底層に分布するもの、全層に分布するものと、細菌の種類によって深度方向の分布が異なることが明らかとなった。

A. 研究目的

近年、浄水場においてピコ植物プランクトンに起因したろ過水濁度の上昇（ろ過漏出障害）が報告されている¹⁾。ピコ植物プランクトンが水源の湖沼において増殖すると、取水後、浄水場ろ過水に漏出することがある。ピコ植物プランクトンとは真核ピコ植物プランクトンと、ピコシアノバクテリアに分かれ、落射蛍光顕微鏡観察における蛍光の色調によって 3 タイプ（CH-type, PE-type, PC-type）に識別されている。顕微鏡観察における形態的特徴に乏しく、形態から障害の原因生物を特定することは困難である。これまで、ろ過漏出障害原因微生物を明らかにすることを目的として、湖沼や浄水場を対象に、クローニング法といった分子生物学的手法を用いてピコ植物プランクトンの生物相評価を行ってきた。草木ダムを水源とする桐生市水道局元宿浄水場ではろ過水から緑藻綱の *Mychonastes* 属と黄金色藻綱の *Spumella* 属に近縁なクローンが検出され、ろ過漏出障害の原因となる可能性が示唆された²⁾。

川崎市上下水道局長沢浄水場において、原水、沈澱処理水、ろ過水について、16S rRNA 遺伝子

のクローニング法による生物相解析を行ったところ、ピコシアノバクテリアは 7 OTUs (Operational Taxonomic Unit) に分かれた³⁾。2013 年 6 月から 9 月の原水、沈澱処理水からは PC-type のピコシアノバクテリアである *Synechococcus* sp. 0BB26S03 に近縁なクローンが多く検出された。ろ過水では PE-type である *Synechococcus* sp. MH305 に近縁なクローンの割合が多かった。これらの結果から *Synechococcus* 属の種類によって砂ろ過による除去特性が異なる可能性が示唆された。同浄水場の各処理工程水について、真正細菌の 16S rRNA 遺伝子を対象に次世代シーケンサーを用いて微生物相の評価を行ったところ、従属栄養細菌の割合が大きく、従属栄養細菌の濁度に対する影響が大きいことが示唆された³⁾。さらに長沢浄水場の原水、第 4 沈澱処理水、北ろ過水について、16S rRNA 遺伝子アンプリコンシーケンシングを用いて、約 3 年間にわたり微生物相について評価を行った結果、原水は Betaproteobacteria 綱および Actinobacteria 綱が主要となった⁴⁾⁵⁾。Betaproteobacteria 綱の *Limnohabitans* 属および Actinobacteria 綱の *Ca. Planktophilia limnetica* は、多

くの月で主要な微生物であった。第4沈澱処理水は主に Betaproteobacteria 綱の占める割合が高かった。採水時期によっては Actinobacteria 綱、Gammaproteobacteria 綱、Cytophagia 綱の割合が高まった。属レベルでは *Limnohabitans* 属が多くの月で主要となった。次いで *Ca. Planktophilia limnetica* と Saprospirae 綱の *Sediminibacterium* 属が主要となった。北ろ過水は多くの月で Gammaproteobacteria 綱が主要となった。また、夏から秋にかけて Alphaproteobacteria 綱が主要であった。冬から春にかけて Cytophagia 綱が高まり主要となった。秋から春にかけて Gammaproteobacteria 綱の *Pseudarcicella* 属と *Crenothrix* 属、春から秋にかけて Gammaproteobacteria 綱の *Enhydrobacter* 属、夏季には Alphaproteobacteria 綱の *Methylobacterium* 属が主要となった。このようにろ過水中の主要な細菌の消長には季節性がみられる傾向にあるものの、ダム湖における消長は明らかとなっていない。そこで本研究では、16S rRNA 遺伝子アンプリコンシーケンシングの結果、長沢浄水場で主要であった細菌が実際のダム湖においてどのような消長を示しているのか検討を行った。

B. 研究方法

B-1 供試試料

2016年4月～2017年3月に宮ヶ瀬ダム中央地点より採水した表層水(水深0.5m)、中層水(水深約40m)、底層水(水深約80m)を用いた。

B-2 生物相解析

孔径 $0.2\mu\text{m}$ のポリカーボネート製メンブレンフィルターを用いて試料を吸引濾過し集菌を行った。ゲノム DNA を抽出後、真正細菌・古細菌の 16S rRNA 遺伝子をターゲットとするプライマー 515F、806R を用いて PCR を行い、NEBNext® Ultra DNA Library Prep Kit for Illumina® (New England BioLabs Inc.)によりライブラリーを作成、Illumina 社の MiSeq によりアンプリコンシーケンシングを行った。各試料について得られた 8万～10万リードについて QIIME を利用して解析を行った

C. 研究結果および D. 考察

長沢浄水場ろ過水における主要な細菌(ろ過水において総リード数の5%以上占めたことのある細菌)の宮ヶ瀬湖における割合を示した(表1)。長沢浄水場ろ過水から18属が主要な細菌として検出された。*Flavobacterium* 属、*Sediminibacterium* 属、*Limnohabitans* 属、*Crenothrix* 属、*Methylocaldum* 属は総リード数に占める割合が1%を超え、宮ヶ瀬湖の細菌群集における主要な構成細菌と考えられた。

Crenothrix 属は5～8月に底層で割合が高まることが明らかとなった(図1)。長沢浄水場ろ過水では11月～2月に割合が高まる。*Sediminibacterium* 属は表層から底層にかけて分布することが明らかとなった(図2)。長沢浄水場ろ過水における検出に季節性は見られなかった。*Methylocaldum* 属は中層・底層で割合が高まることが明らかとなった(図3)。長沢浄水場ろ過水では8月～10月に割合が高まる傾向がみられている。*Flavobacterium* 属は春季に表層で割合が高まることが明らかとなった(図4)。長沢浄水場ろ過水においても春季に割合が高まる。*Limnohabitans* 属は年間にわたって表層に分布することが明らかとなった(図5)。長沢浄水場ろ過水における検出に季節性は見られなかった。

E. 結論

水源におけるろ過漏出障害原因微生物の季節的な推移、分布を評価する上で次世代シーケンサーによる16S rRNA 遺伝子アンプリコン解析は有用である。浄水場ろ過水における主要な細菌の実湖沼における分布を調べたところ、表層に分布するもの、中層・底層に分布するもの、全層に分布するものと、細菌の種類によって深度方向の分布が異なることが明らかとなった。

F. 健康危険情報

該当なし

G. 研究発表

論文発表

藤本尚志, 山崎雄佑, 遠藤沙紀, 渡邊英梨香, 蔣紅与, 大西章博, 藤瀬大輝, 三浦尚之, 秋葉道宏. 16S rRNA 遺伝子の解析による浄水場処理工程水のピコシアノバクテリア生物相の評価, 用水と廃水 59(9), 667-674, 2017.

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。)

該当なし

I. 参考文献

- 1) 矢澤秀行. 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, 2002, 44(9), pp. 15-21.
- 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, 2013, 82(5), pp.2-10.
- 3) 藤本尚志, 大西章博, 鈴木昌治, 藤瀬大輝, 岸田直裕, 秋葉道宏. クローニング法および次世代シーケンサーによるろ過漏出障害原因生物の

評価. 平成 26 年度全国会議(水道研究発表会) ; 2014 年 10 月 ; 名古屋. 同講演集 pp. 540-541.
 4)渡邊英梨香, 藤本尚志, 大西章博, 鈴木昌治, 藤瀬大輝, 秋葉道宏. 培養法と 16S rRNA 遺伝子アンプリコンシーケンシングによる浄水場ろ過水の細菌相の評価. 平成 28 年度全国会議 (水道研究発表会) ; 2016 年 11 月, 京都市. 同講演集 pp.

758-759.

5)渡邊英梨香, 藤本尚志, 大西章博, 鈴木昌治, 藤瀬大輝, 松倉智子, 秋葉道宏. 浄水場処理工程水における微生物相の長期的評価. 第 51 回日本水環境学会年会; 2017 年 3 月, 熊本市. 同講演集 pp. 204.

表 1 長沢浄水場ろ過水の主要な細菌の宮ヶ瀬湖における割合
 (ろ過水において総リード数の 5%以上占めたことのある細菌、平均は表層、中層、底層の 1 年間のデータすべての平均値を示す)

門 or 綱	属	最小 (%)	最大 (%)	平均 (%)
Actinobacteria	<i>Candidatus_P lanktophila</i>	0.04%	0.50%	0.12%
Bacteroidetes	<i>Flavobacterium</i>	0.03%	23.02%	1.53%
Bacteroidetes	<i>Sedimentibacterium</i>	0.36%	14.54%	3.79%
Cyanobacteria	<i>Synechococcus</i>	0.00%	0.90%	0.15%
Deinococcus-Thermus	<i>Deinococcus</i>	0.00%	0.00%	0.00%
Planctomycetes	<i>Gemmata</i>	0.00%	0.26%	0.06%
Alphaproteobacteria	<i>Methylobacterium</i>	0.00%	0.03%	0.00%
Alphaproteobacteria	<i>Methylobaculum</i>	0.00%	0.02%	0.00%
Alphaproteobacteria	<i>Azorhizobium</i>	0.00%	0.00%	0.00%
Alphaproteobacteria	<i>Sphingobium</i>	0.00%	0.02%	0.00%
Betaproteobacteria	<i>Limnochlamydomonas</i>	0.05%	7.15%	1.63%
Gammaproteobacteria	<i>Crenothrix</i>	0.00%	12.58%	2.58%
Gammaproteobacteria	<i>Methylobaculum</i>	0.00%	6.01%	1.32%
Gammaproteobacteria	<i>Acinetobacter</i>	0.00%	1.80%	0.06%
Gammaproteobacteria	<i>Enhydrobacter</i>	0.00%	0.02%	0.00%
Gammaproteobacteria	<i>Pseudomonas</i>	0.00%	0.26%	0.03%
Verrucomicrobia	<i>Opitutus</i>	0.01%	0.92%	0.45%
Verrucomicrobia	<i>Candidatus_Xiphinematobacter</i>	0.00%	0.01%	0.00%

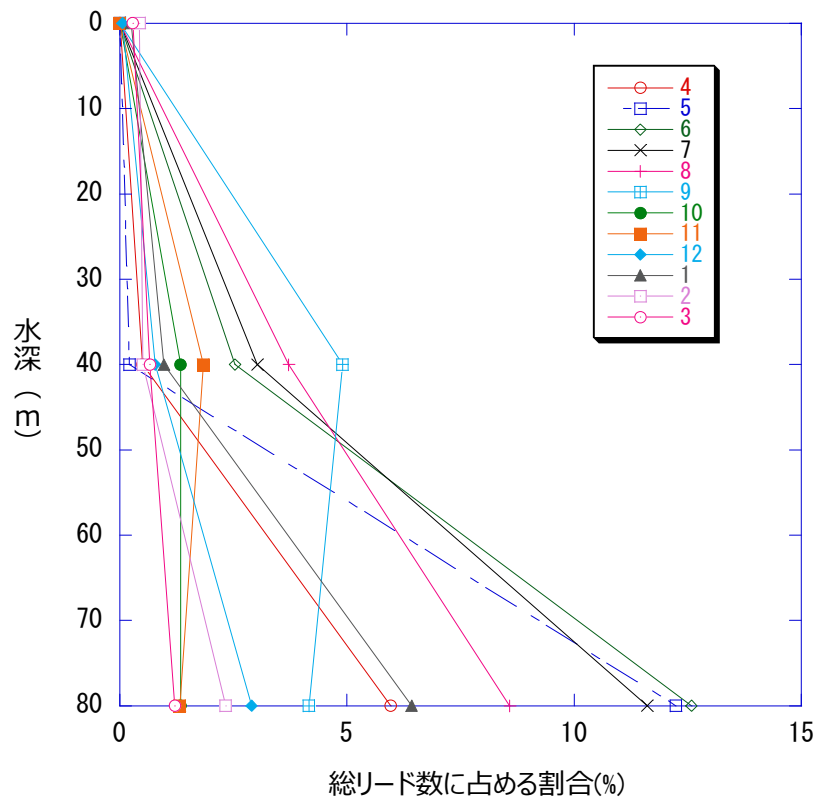


図1 Gammaproteobacteria 綱 *Crenothrix* 属の鉛直分布

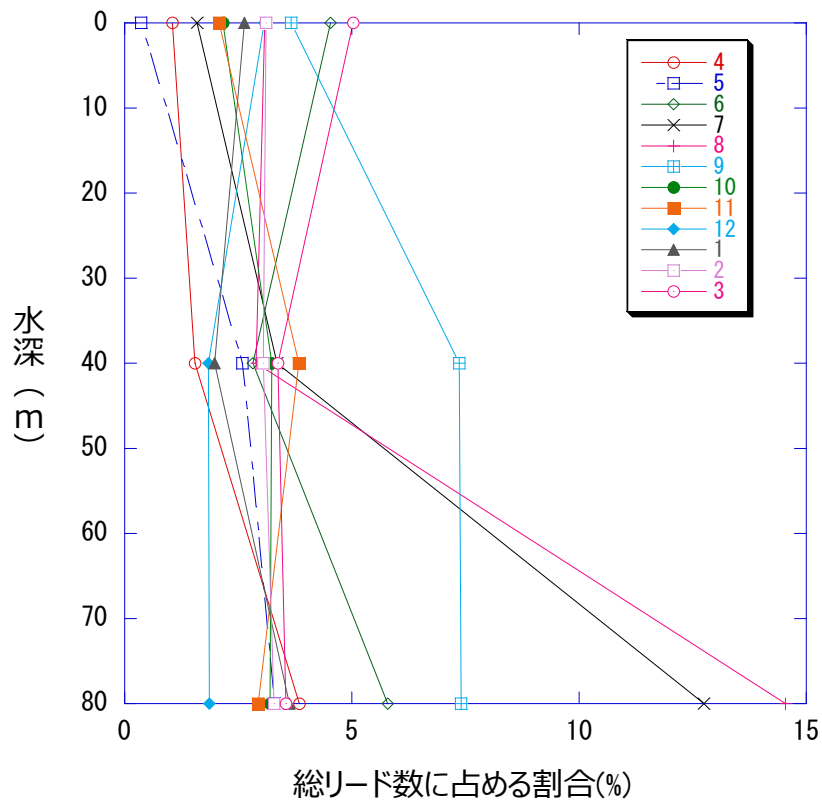


図2 Bacteroidetes 門 *Sediminibacterium* 属の鉛直分布

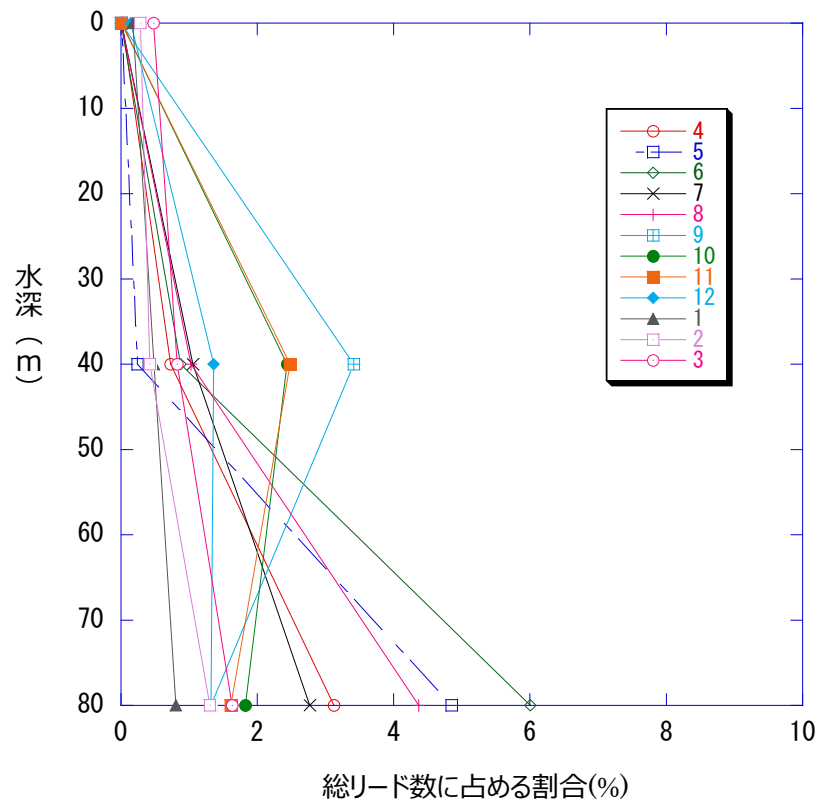


図 3 Gammaproteobacteria 綱 *Methylocaldum* 属の鉛直分布

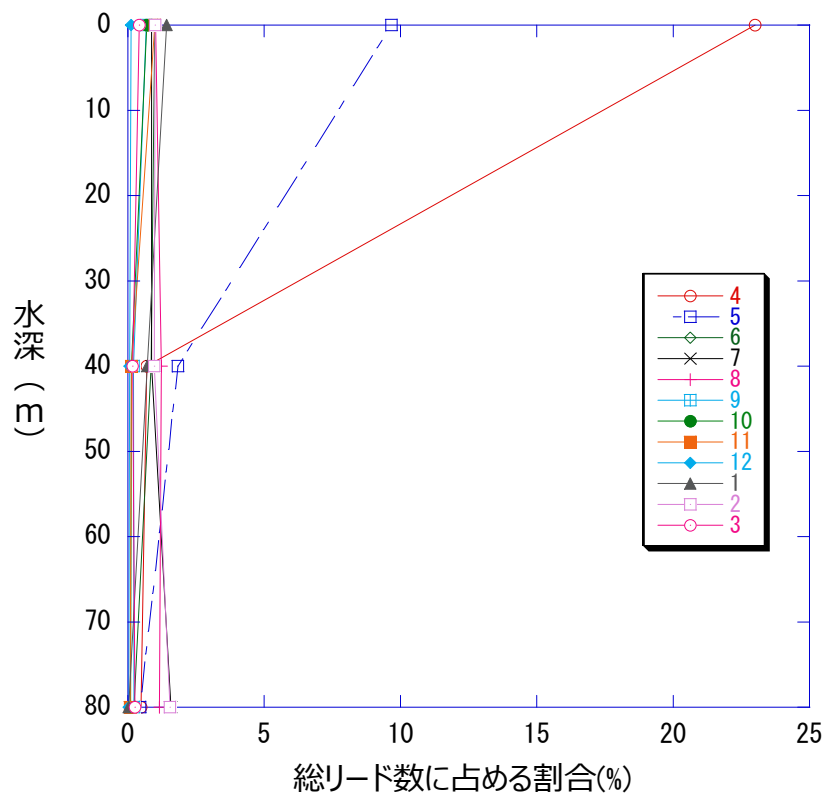


図 4 Bacteroidetes 門 *Flavobacterium* 属の鉛直分布

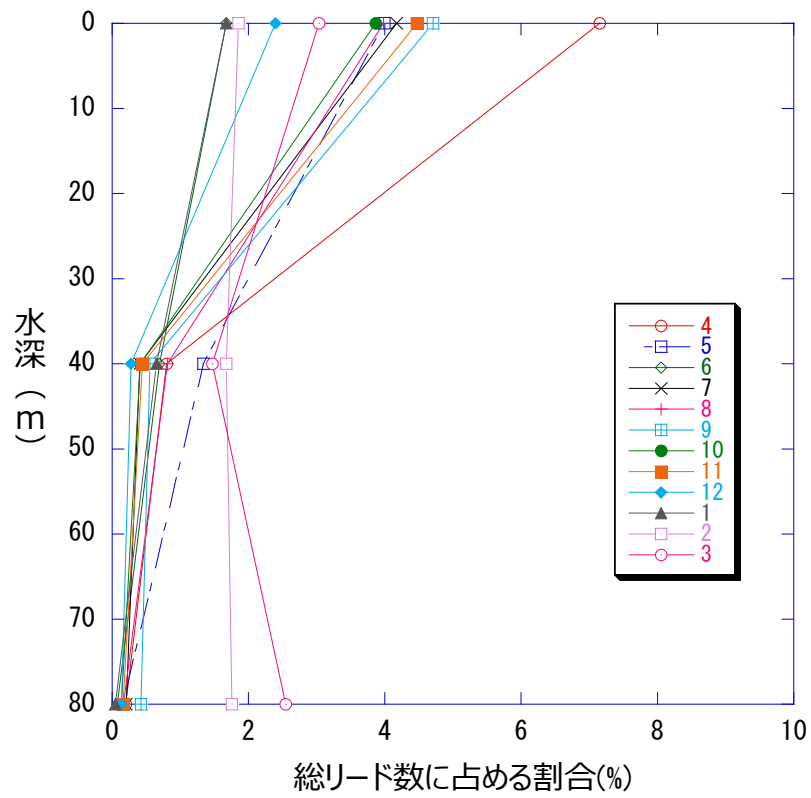


図5 Betaproteobacteria 綱 *Limnohabitans* 属の鉛直分布

高分解能質量分析計を用いた
臭気原因物質の探索

研究代表者	秋葉 道宏
研究分担者	高梨 啓和
研究分担者	下ヶ橋 雅樹
研究協力者	小倉 明生
研究協力者	北村 壽朗

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)
分担研究報告書

「大規模災害および気候変動に伴う利水障害に対応した環境調和型
水道システムの構築に関する研究」

研究課題：高分解能質量分析計を用いた臭気原因物質の探索

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	高梨啓和	鹿児島大学学術研究院理工学域工学系 准教授
研究分担者	下ヶ橋雅樹	国立保健医療科学院生活環境研究部 上席主任研究官
研究協力者	小倉明生	京都市上下水道局水質管理センター 担当課長補佐
研究協力者	北村壽朗	神奈川県企業庁水道水質センター 所長

研究要旨

水道水の異臭味障害の中で2番目の発生頻度となっている生ぐさ臭については、その臭気原因物質が十分に明らかとなっているとは言い難い。このため、浄水場では、機器分析ではなく官能試験によって水質管理が行われている。そこで本研究では、水道水生ぐさ臭の臭気原因物質を同定することにより、現在の官能試験による水質管理に代えて、機器分析による水質管理に道を開くことを目的とした。

臭気原因物質は、予想される物理化学的性質からGC/MSによる分析が適していると考えられる。このため本年度は、昨年度までのLC/MSによる検討に代えて、におい嗅ぎシステムを装備したGCに高分解能質量分析を接続したGC/MSによる検討を実施した。生ぐさ臭の原因生物であるウログレナが発生した際に採取した水道原水と、ウログレナの培養液を分析した。両者は、水源が異なる浄水場関連施設から採取した試料だが、共通する臭気成分が3成分発見された。

A. 研究目的

水道水の異臭味障害の中で2番目の発生頻度となっている生ぐさ臭¹⁾については、原因物質として1-heptanal、(2E,4E)-heptadienal、(2E,4Z)-heptadienal、(2E,4Z)-decadienal、(2E,4E,7Z)-decatrienal²⁾が指摘されている。しかし、浄水場では、これらの物質からは生ぐさ臭とは異なる臭気を感じるという意見があり、他に原因物質が存在する可能性がある。このように、十分な知見が集積されていないことなどから、生ぐさ臭については、水道法において、物質の濃度ではなく臭気強度で項目化されている。生ぐさ臭の臭気原因物質(以下、原因物質)が明らかになれば、詳細な実態調査、物性値に基づいた効率的な浄水処理技術の開発などに繋がる可能性があり、有益である。

以上のように、原因物質の同定は意義深い、環境中の微量有機物の同定には困難を伴う。未知有機物の同定は、一般的に、フーリエ変換赤外分光光度計(FTIR)による官能基推定、核磁気共鳴装置(NMR)による構造解析、質量分析(MS)

による分子量測定などにより行われる。しかし、FTIRやNMRでの測定を行うためには、夾雑物を除去したサンプルが数百μg程度必要になる。揮発性物質と考えられる原因物質を、精製した上で数百μg程度得ることは困難と予想される。

そこで本研究では、近年の質量分析の進歩を活用し、原因物質の構造を推定することとした。合成などにより、推定された構造の物質を入手できれば、原因物質の同定が可能である。

原因物質は、予想される物理化学的性質から、GC/MSによる分析が適していると考えられる。しかし、未知物質の構造推定には分子量関連イオンの検出確率が高いソフトなイオン化であるelectrospray ionization(ESI)を備え、構造推定に有効なlinear ion trapを備えた高分解能LC/MSが適している。このため、LC/MSで被検物質(分析種)を測定するに必要な誘導体化処理方法を一昨年度検討し、これを確立した。さらに、昨年度は、確立した方法を用いて、生ぐさ臭の原因生物である黄色鞭毛藻綱*Uroglena americana*(ウログレナ)が発生した際に採取した水道原水を対象に分析

を行った。また、これらとは水源が異なる浄水場関連施設から、生ぐさ臭の原因生物であるウログレナを培養した培養液の提供を受け、同様の分析を行った。その結果、これらのサンプルに共通し、臭気強度およびウログレナ細胞数と相関関係が認められる物質を1物質発見し、その分子式を推定した。

しかし、その相関関係は外れ値 (outlier) の影響を受けており、十分な信頼性を担保できていない。適度な強度の生ぐさ臭が発生した際のサンプルを採取できない限り解決できない問題なので、異なるアプローチが必要と考えた。

そこで本年度は、そのアプローチとして、におい嗅ぎシステムを装備した GC に高分解能質量分析を接続した GC/MS による検討を行った。

B. 研究方法

1. 試料水

京都市上下水道局蹴上浄水場取水池で、2017年12月6日から12月25日までに採水した3検体を水道原水試料水として用いた。採水は、ガロン瓶の口いっぱいまで行い、速やかに試験に供した。また、神奈川県宮ヶ瀬ダム放流水から採取したウログレナを、表1に示す Ur-1 培地を用いて、表2に示す条件で培養した。培養の結果、ウログレナの細胞数は14,000個/mLとなった。その培養液を培養試料液として用いた。また、ウログレナを植種していない培地をコントロールサンプルとして用いた。

2. 試料水の濃縮

水道原水試料水中に存在する溶存酸素を除去するために、試料水3.7Lに対して1.75M亜硫酸ナトリウム水溶液を1mL添加し、ゆっくりと攪拌した。その後、ウログレナの細胞内に蓄積されている原因物質を細胞外に放出させるために、密閉した容器内で30分間60°Cに加熱した。培養試料液は、約1.75Mになるよう亜硫酸ナトリウムを添加して攪拌した後、密閉した容器内30分間60°Cに加熱した。室温になるまで放冷した後、ポリプロピレン製ハウジングのホウケイ酸ガラス製マイクロファイバーフィルター (Millex-AP50, Merck Millipore, Germany) を用いて加圧ろ過を行った。

表1 Ur-1 培地の組成

MgSO ₄ ·7H ₂ O	10 mg
CaCl ₂ ·2H ₂ O	10 mg
KCl	1 mg
NH ₄ NO ₃	5 mg
β-グリセロリン酸ナトリウム·5H ₂ O	4 mg
Fe-EDTA	0.5 mg
ビタミンB ₁	10 μg
ビタミンB ₁₂	0.1 μg
ビオチン	0.1 μg
PIV金属混液	1 mL
精製水	999 mL
pH	7.5

表2 *Uroglena americana* の培養条件

項目	条件
温度 [°C]	15
光強度 [μmol/(m ² s)]	39
明暗条件	12時間明/12時間暗
培養期間	2016/7/1~2016/7/29

ろ過された試料水は、直列に連結された2種類の固相吸着カートリッジ (Sep-Pak PS-2 および AC-2、日本ウォーターズ、東京) にインラインで通水され (20 mL/min)、疎水性相互作用により試料水中の原因物質を吸着した。なお、固相吸着カートリッジは、使用前に、アセトニトリおよび超純水を用いて洗浄・コンディショニングを実施した。原因物質を吸着した後、4 mLのアセトニトリを用いて原因物質を脱離した。脱離は、バックフラッシュで行い、流速を0.5 mL/minとした。脱離の途中で、3 minのsoak timeを設けた。また、コントロールサンプルに加え、純水を用いて一連の操作を実施したブランクサンプルを調製した。水道原水試料水の濃縮倍率は1,333倍、培養液は222倍とした。

3. GC-O-APCI-TOFMS

におい嗅ぎシステムを装備した GC に高分解能質量分析を接続した GC/MS は、GC 部に 7890B (Agilent Technology, CA, USA)、におい嗅ぎ部にスニッフィングポート OP275L (ジーエルサイエンス、東京)、APCI-TOFMS に Synapt G2 Si HDMS (Waters, MA, USA) をそれぞれ用いた。システムの模式図を図1に、APCIのイオン化反応を図2に示す。図1に示したように、GCカラムで分離された臭気物質がにおい嗅ぎポートに到達するのに必要な時間と MS に到達するのに必要な時間が

異なるため、予め標準物質を用いて補正した。図2に示したように、水分子を介さないイオン化と介したイオン化を行えるので、両方のイオン化を試みた。

GCカラムには、Inertcap 5 (ジーエルサイエンス、15 m×0.53 mm)、キャリアガスにはHeを用いた。昇温プログラムは、40 °C (0-1 min), 10 °C/min to 260°C (1-23 min), 260 °C (23-30 min)とした。その他の測定条件を表3に示す。

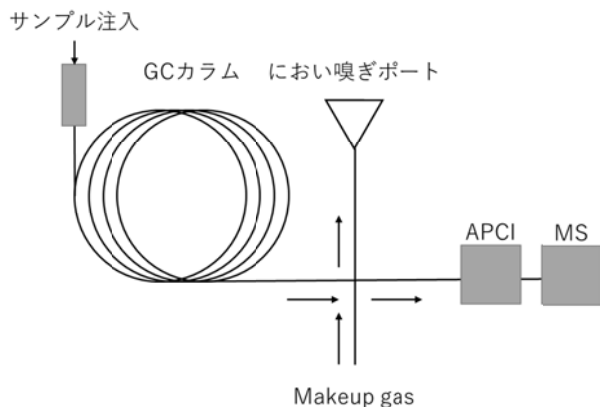
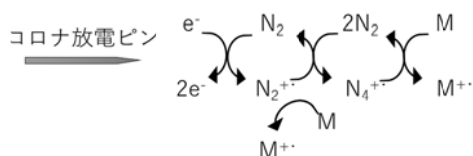


図1 GC-0-APCI-TOFMS のシステム模式図

Dry条件(イオン化室に水分子がない条件)



Wet条件(イオン化室に水分子がある条件)

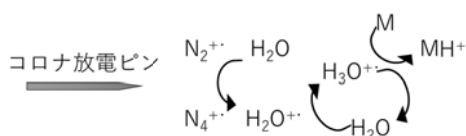


図2 APCI のイオン化機構

表3 GC/MS の測定条件

Carrier Gas flow	8.0 mL/min, (60.6 cm/sec)
Front Inlet Temp.	230□
Aux. Temp.	270□
Injection Volume	2 μL
MS Mode	Resolution Mode
Polarity	Positive Ion Mode
Corona	1.0 μA
Sampling Cone	40
Source Offset	80
Source Temp.	150□
Cone Gas Flow	230 L/h
Aux. Gas Flow	200 L/h

C. 結果及び考察

1. GC-0 を用いた臭気物質の分離

水道原水濃縮サンプル (3 サンプル)、およびウログレナ培養液濃縮サンプル (1 サンプル) を分析した結果、表4に示す結果が得られた。

表4 におい嗅ぎシステム付き GC での分析結果

RT (min)	ウログレナ培養液	水道原水1 (TON 43)	水道原水2 (TON 23)	水道原水3 (TON 18)
	臭気種類			
7.2	米	米	米	米
8.7	昆布だし			
10.4		アンモニア	アンモニア	
11.2		カレールー	カレールー	
12.1	ベニヤ板		ベニヤ板	ベニヤ板
13.7	植物葉	植物葉		
14.3		牛革	牛革	
15.3		果物		果物
17.2	牛乳	牛乳	牛乳	

RT: カラム保持時間

水道原水は、臭気強度が強くなるほど測定者が感じ取った臭気物質の数が多くなった。このため、臭気強度が最も強かった水道原水1の測定結果に着目した。水道原水1の測定結果とウログレナ培養液の測定結果を比較し、両者で共通する臭気種類を抽出すると、測定者が「米」、「植物葉」および「牛乳」と表現する臭気物質が共通していることが分かる。これらの表現は生ぐさ臭と異なる表現であるが、臭気成分は濃度によって感じ方が異なることがあるため、これらの臭気物質に着目してさらに検討することとした。さらに、生ぐさ臭がする水道原水は、条件によっては昆布だしに似たにおいがするとの意見があるため、水道原水からは検出されなかったがウログレナ培養液から

検出された RT=8.7 min の臭気物質で、「昆布だし」と表現される物質にも着目して検討することにした。

2. GC-O-APCI-TOFMS による臭気成分の検討

このため、APCI のイオン化の条件を再度検討したが、明確なピークの検出には至らなかった。そこで次に、LC/MS データ統合解析ソフト (Progenesis QI v2.2, Nonlinear Dynamics, UK) を活用して、サンプルの測定に先だって測定され

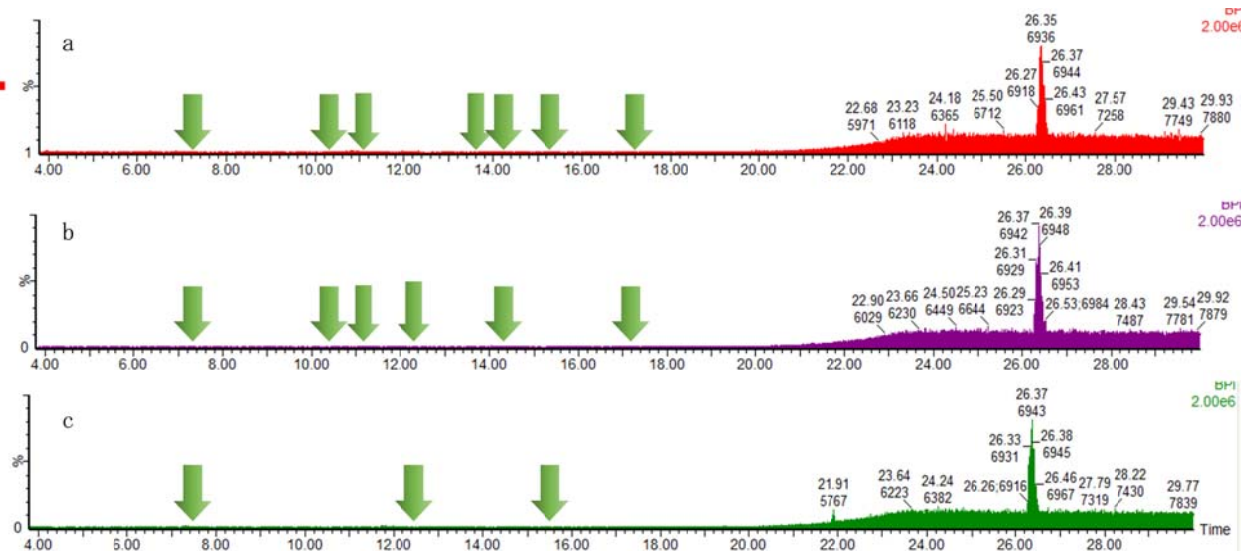


図3 GC-O-APCI-TOFMS で分析した水道原水に含まれる物質の基準ピーククロマトグラム (a : TON=43 のサンプル、b : TON=23 のサンプル、c : TON=18 のサンプル、矢印は、GC-O で臭気成分が検出された RT)

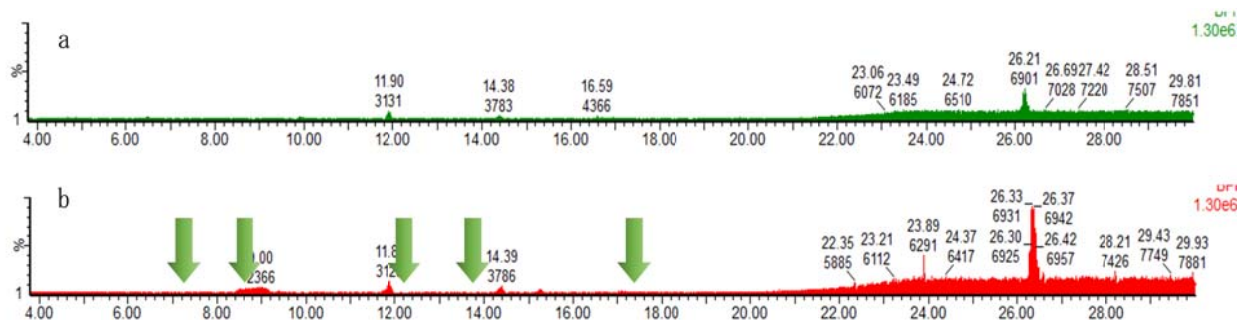


図4 GC-O-APCI-TOFMS で分析したウログレナ培養液に含まれる物質の基準ピーククロマトグラム (a : コントロールサンプル、b : 培養液サンプル、矢印は、GC-O で臭気成分が検出された RT)

水道原水濃縮サンプル (3 サンプル)、およびウログレナ培養液濃縮サンプル (1 サンプル) を分析した。得られた結果を図 3、4 に示す。すべての測定結果において、GC-O を用いた検討で臭気物質が検出された RT (補正後の RT) に目視で確認できる明確なピークが認められないことが分か

た。一方、測定者が「昆布だし」、このため、APCI のイオン化の条件を再度検討したが、明確なピークの検出には至らなかった。そこで次に、LC/MS データ統合解析ソフト (Progenesis QI v2.2, Nonlinear Dynamics, UK) を活用して、サンプルの測定に先だって測定され

「米」および「牛乳」と表現する臭気物質が検出された RT (補正後の RT) に一致する物質は検出されなかった。

臭気物質の中でイオン化できなかった可能性が高い物質が多く存在したため、それらの物質がどのような物質なのかを考察した。考察は、同技術を用いてイオン化可能な物質を調べることにより行った。これは、どのような物質がイオン化できないかの情報がほとんど得られないためである。すなわち、イオン化されやすい物質の部分構造を推定することによって、本研究でイオン化できなかった物質がそれらの構造を有していない可能性があることを考察した。

同技術で測定可能とされている 338 物質³⁾について、部分構造を検討した。その際、1 物質について、最大 5 個の部分構造が抽出された。検討の結果、合計 1,033 個の部分構造が抽出された。その 1,033 個の主な部分構造を見ると、クロロベンゼン、有機リン、アミドなどであり、酸素以外のヘテロ元素を含む部分構造が大多数を占めた。ヘテロ元素を含まないか、炭素と水素および酸素から成る部分構造は、シクロセキセン、エステル、エーテル、ケトン、三級アルコールなどであった。昨年度発見した、臭気強度およびウログレナ細胞数と相関関係が認められる物質は、炭素と水素および酸素から成る物質であり、アルデヒド類と推定された。検討されている 338 物質の中のアルデヒド類を探したところ 1 物質発見された。しかし、その物質は、ホルミル基の他に、APCI でイオン化されやすい三級アミン構造を有していた。このため、同物質は三級アミン構造によりイオン化されると考えられる。すなわち、イオン化されやすい他の官能基を有さないアルデヒド類は、本研究で用いた APCI ではイオン化されにくいと考えられる。これらのことから、本研究で検出された臭気物質の中でイオン化できなかった物質は、酸素以外のヘテロ元素を有する可能性や、シクロセキセン、エステル、エーテル、ケトン、三級アルコールなどの構造を有する可能性が低い物質と考

察される。

E. 結論

水道原水とウログレナ培養液に共通する臭気成分を 3 成分発見した。しかし、本研究で用いたイオン化法では、それらのうちの 2 成分をイオン化できなかった。イオン化できた 1 成分の m/z は 146.962 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

該当なし

2) 学会発表

新福優太、高梨啓和、中島常憲、大木 章、下ヶ橋雅樹、秋葉道宏、NPH 誘導体化アルデヒドを LC/MS で測定する際の妨害物質の除去、第 52 回日本水環境学会年会、1-J-11-4.

新福優太、高梨啓和、中島常憲、大木 章、下ヶ橋雅樹、秋葉道宏、DNPH 誘導体化における測定妨害物質の除去を目的とした固相抽出の適用、第 20 回日本水環境学会シンポジウム、p.123.

新福優太、高梨啓和、中島常憲、大木 章、下ヶ橋雅樹、秋葉道宏、高分解能質量分析計と多変量解析による水道水生ぐさ臭原因物質の探索、環境科学会 2017 年会、1C-0930/P-18.

Yuta Shinfuku, Hirokazu TAKANASHI, Tsunenori Nakajima, Akira Ohki, Masaki Sagehashi and Michihiro Akiba, Exploring a Fishy-Smelling Substance in Raw Waters for Water Supply with High Resolution Mass Spectrometry and Multivariate Analysis, the Water and Environment Technology Conference 2017, Hokkaido, Hokkaido University, 3A-17.

Yuta Shinfuku, Hirokazu Takanashi, Tsunenori Nakajima, Akira Ohki, Masaki Sagehashi and Michihiro Akiba, Exploring a fishy-smelling

compound in raw waters with high resolution mass spectrometry and multivariate analysis, 26th Symposium on Environmental Chemistry, Shizuoka, 3E-06.

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. 謝辞

本研究を実施するにあたり、京都市上下水道局水質管理センター水質第1課の職員より、試料水採取などで協力を受けた。また、神奈川県企業庁水道水質センターの職員より、*Uroglena americana* 培養液の提供およびその前処理への協力を受けた。ここに記して謝意を表す。

J. 参考文献

- 1) 秋葉道宏、岸田直裕、下ヶ橋雅樹 (2014) 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.
- 2) Watson S.B., Satchwill T., Dixon E., McCauley E. (2001) Under-ice blooms and source-water odour in a nutrient-poor reservoir: biological, ecological and applied perspectives, *Freshwater Biology*, **46**, 1553-1567.
- 3) Laura Cherta, Tania Portolés, Joaquim Beltran, Elena Pitarch, Johannes G.J. Mol, Félix Hernández (2013) Application of gas chromatography – (triple quadrupole) mass spectrometry with atmospheric pressure chemical ionization for the determination of multiclass pesticides in fruits and vegetables, *Journal of Chromatography A*, **1314**, 224-240.

カビ臭発生予測手法の構築

研究代表者	秋葉	道宏
研究分担者	清水	和哉

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）
「大規模災害および気候変動に伴う利水障害に対応した環境調和型水道システムの構築に関する研究」
分担研究報告書

研究課題：カビ臭発生予測手法の構築

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 清水 和哉 筑波大学生命環境系 准教授

研究要旨

水源におけるカビ臭発生予測手法の構築を目的とした。水道水源における障害生物の挙動実態の把握および障害生物やカビ臭発生の制御を実施するには、カビ臭物質産生微生物（藍藻類や放線菌）の個体群数の定量、カビ臭物質産生の引き金因子の特定、の知見は重要である。これら知見は、カビ臭発生予測手法および障害生物やカビ臭発生の制御の評価手法の構築に資する。昨年度までの研究成果で、カビ臭物質産生総量は、個体群数と正の相関関係があることを確認し、一細胞当たりのカビ臭物質産生活性は、増殖が抑えられている時であった。つまり個体群数をモニタリングすることで、カビ臭発生予測が可能となることが推察された。一方、産生されたカビ臭物質の局在が明らかにされておらず、産生後、細胞内に蓄積されるのか、速やかに細胞外に排出されるのか、わかっていない。そこで、本年度は、個体群数定量に必要なカビ臭物質合成遺伝子の確認および簡易なカビ臭物質産生藍藻類の定量方法の開発を実施した。ジェオスミン産生藍藻類は、ジェオスミン合成酵素遺伝子 *geoA* ホモログを用いて、個体群数を定量できるものの、2-メチルイソボルネオール（2-MIB）合成には、様々な合成に関与するメチルトランスフェラーゼ遺伝子（*mts* 遺伝子）が関与するため、発現解析を行った。加えて、形態観察では判別が困難なジェオスミン産生・非産生藍藻類を簡易に識別する方法の開発を試みた。これらの結果、ジェオスミン産生藍藻類として用いた *Dolichospermum smithii* NIES-824 では、ジェオスミン産生後、細胞内に保持する傾向にあったが、2-MIB 産生藍藻類として用いた *Pseudanabaena galeata* NIES-512 では、ほとんどが細胞外に局在した。2-MIB 合成に関与する *mts* 遺伝子の発現量は、細胞密度が低い増殖初期が最大となり、細胞密度が高い増殖後期では、低かった。一方、ジェオスミン産生藍藻類の簡易識別法として、*geoA* 遺伝子を標的とした whole-cell PCR 法（Cell Direct PCR 法）を開発した。

以上から、カビ臭発生予測法としてのカビ臭物質産生藍藻類の個体群密度の定量法を開発するとともに、カビ臭発生前後での上水処理管理に資するカビ臭の局在を明らかにした。

A. 研究目的

我が国の主な上水水源は、表流水であるため気候変動に影響を受けやすいといえる。環境因子の変動や気温上昇に伴う水温の上昇は、水源環境微生物群集の代謝に影響を与える、とくにカビ臭物質は、水道水質を悪化させる生物由来の水汚染物質である。その産生原因生物は、二次代謝が発達している放線菌

と藍藻類であり、環境因子の変動に影響を受けやすいと考えられる。カビ臭物質が、生物由来の物質であることから、化学物質による水汚染とは異なり、発生および消失の予測や発生抑制制御が困難であった。近年のカビ臭物質産生微生物の分子生物学的知見により、培養や顕微鏡による手法に加えて、カビ臭物質産生放線菌¹⁾や藍藻類²⁾の定量手法（早期

検出技術に応用可能)が構築できると考えられる状況となってきた。しかしながら、分子生物学的解析で標的としているカビ臭物質合成酵素遺伝子の保存性に関する知見が少なく、分子生物学的手法の適用の課題となっている。一方、カビ臭発生対策手法の構築には、どのような環境因子が引き金となってカビ臭物質産生にいたるのかを解明することが必要となる。これは、カビ臭発生予測やカビ臭制御の評価にも重要な知見となるため、カビ臭物質産生に与える環境因子の解析が報告されてきた^{3,7)}。今後、水源池におけるカビ臭発生予測手法及びカビ臭発生抑制手法の確立は、持続的な水質管理に極めて重要であると広く認識されていることから、室内実験による環境因子の知見とカビ臭発生現場における環境因子の知見を総合させ、それら手法を構築することが急務となっている。

昨年度までに、昨年度までの研究成果で、ジェオスミン合成酵素遺伝子 *geoA* ホモログや2-メチルイソボルネオール (2-MIB) 合成に関与する遺伝子メチルトランスフェラーゼ遺伝子とシクラーゼ遺伝子は放線菌と藍藻類間の各遺伝子の相同性は低く、放線菌と藍藻類を分けた分子生物学的解析が可能であると推測された。藍藻類では *geoA* 遺伝子ホモログを用いて各「属」を区別でき、「属」毎の個体群数定量を可能とできることがわかった。一方、2-MIB のメチルトランスフェラーゼ遺伝子とシクラーゼ遺伝子は、各「属」を区別できないため、2-MIB 産生藍藻類全体の個体群数定量となることがわかった。つまり個体群数をモニタリングすることで、カビ臭発生予測が可能となることが推察された。一方、産生されたカビ臭物質の局在が明らかにされておらず、産生後、細胞内に蓄積されるのか、速やかに細胞外に排出されるのか、わかっていない。この知見は、カビ臭発生前後の水処理プロセスに寄与する。

そこで、本年度は、個体群数定量に必要なカビ臭物質合成遺伝子を用いた簡易なカビ臭物質産生藍藻類の定量方法の開発を実施した。ジェオスミン産生藍藻類は、ジェオス

ミン合成酵素遺伝子 *geoA* ホモログを用いて、カビ臭物質産生活性を定量できるものの、2-メチルイソボルネオール (2-MIB) 合成には、様々な合成に関与するメチルトランスフェラーゼ遺伝子 (*mts* 遺伝子)⁸⁾が関与するため、発現解析を行った。加えて、形態観察では判別が困難なジェオスミン産生・非産生藍藻類を簡易に識別する方法の開発を試みた。

B. 研究方法

1) 藍藻類のカビ臭物質の局在解析

供試藍藻類は、国立環境研究所微生物系統保存施設より得た、ジェオスミン産生藍藻類として、*Dolichospermum smithii* NIES-824 (*Anabaena smithii* NIES-824)、また 2-MIB 産生藍藻類として、*Pseudanabaena galeata* NIES-512 を用いた。両藍藻類とも標準培地が CT 培地であり、CT 培地の TN/TP が、8.1 であった。また、CT 培地の窒素成分量を 2 倍量と変化させた改変 CT 培地の TN/TP は、13.1 であった。培養温度は、28°C、光強度は、60.3 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、明暗周期を 12 h として培養した。細胞増殖量を示すクロロフィル a (Chl.a) をホットメタノール法により抽出し、分析した。カビ臭物質は、固相抽出-GC/MS 法により分析し、カビ臭物質の局在を解析した。加えて、*P. galeata* NIES-512 から全 RNA を抽出後、ランダムプライマーで cDNA を作成し、メチルトランスフェラーゼ遺伝子 (*mts* 遺伝子) の発現解析を実施した。全てのサンプル (n=5) は、植菌後 4 日経過する毎に採取した。

2) カビ臭物質産生藍藻類の簡易識別法・定量法の開発

簡易識別・定量のどちらも実施できる方法として、PCR 法に着目した。PCR に必要な機器であるサーマルサイクラーは、近年は、安価に導入できるため、アガロース電気泳動装置等を含めた導入コストは、安価になり、多くの現場において導入が可能であると想定できる。形態観察で判別が困難なジェオスミン産生藍藻類 *Dolichospermum* sp. を対象と

し、供試藍藻類は、*D. smithii* NIES-824 とした。識別には、分離藍藻類が、真核生物の藻類ではなく、原核生物の藍藻類であることおよび PCR 反応の陽性を判断するコントロールとして、ジェオスミン合成酵素遺伝子 *geoA* ホモログとともに 16S rRNA 遺伝子も同時に増幅させる multiple whole-cell PCR 法の開発を試みた。昨年度に作成した *Dolichospermum* sp. が保持する *geoA* ホモログのアライメント解析から、複数の PCR プライマーを作成した。本報告書においては、検討した結果として、最適なプライマーとサーマルサイクル条件を示す。*geoA* ホモログ増幅用プライマーは、*geoA_Doli_540F* (5'-ccccattgaatacattgaatgc-3')、*geoA_Doli_774R* (5'-acgtcaactacaagcacacag) を用いた。加えて、16S rRNA 遺伝子用プライマーは、藍藻類ユニバーサルプライマーセットである 27F (5'-agagtttgatcctggctcag-3') と 1494Rc (5'-tacggctacctgttacgac-3') を用いた。DNA ポリメラーゼは、MightyAMP™ DNA Polymerase Ver.3 (Takara Bio Inc, Shiga, Japan) を用いた。PCR 反応液の条件は、本ポリメラーゼの説明書通りに作成した。サーマルサイクル条件は、初期変性 98°C、2 分、30 回のサーマルサイクル反応; 変性 98°C、10 秒、アニーリング 60°C、15 秒、伸長 68°C、90 秒、と設定し、PCR を行った。PCR 結果を確認するため、2% アガロースによる電気泳動を行った。

C. 研究結果および D. 考察

1) 藍藻類のカビ臭物質の局在解析とカビ臭物質合成関連遺伝子の発現量解析

上水で問題となっているカビ臭物質は、ジェオスミンと 2-MIB である。しかしながら、これらの局在について詳細がわかっていない。この局在の知見は、カビ臭発生時の上水処理プロセスでの対策に寄与できる。TN/TP に関係せずに、*D. smithii* NIES-824 が産生するカビ臭物質

geosmin は、最大約 1 割が細胞外、つまり溶存態として存在していることがわかった (図 1)。も総 *geosmin* 濃度が対数増殖期からほぼ一定となるものの、溶存態 *geosmin* 濃度は定常期から死滅期の間に最大となっている。つまり、産生された *geosmin* は、細胞内に保持され、定常期から死滅期の間に多くの藍藻類細胞が溶解等により、*geosmin* は細胞内から細胞外へと行こうすると推察された。

ジェオスミン濃度と細胞量には正の相関関係があることから、ジェオスミン産生藍藻類の個体群数の定量は、ジェオスミン発生予測手法に寄与できる。一方、本研究成果から細胞内にジェオスミンが、局在していることから、選択的取水や塩素処理等で細胞破壊を引き起こす処理を行う前に凝集沈殿処理等によって藍藻類細胞を除去することは、後段の水処理プロセスにジェオスミンを極力持ち込まないことに繋がるため、上水の質の管理が改善されると考えられる。

他方、*P. galeata* においては、TN/TP に関係せずに総 2-MIB 濃度と溶存 2-MIB 濃度がほぼ等しく、2-MIB は産生された後に、速やかに細胞外に移行しているものと推測された。2-MIB は、ジェオスミンと比較して、除去しにくいといわれていることから、2-MIB 産生藍藻類の増殖を確認した場合、早期に対応を計画する必要があるといえる。2-MIB 合成の初期に関与するメチルトランスフェラーゼ遺伝子 (*mts* 遺伝子) の発現解析を実施したところ、2-MIB 濃度が増加する前に、発現量が高いことがわかった (図 3)。したがって、2-MIB 産生が活発になる際に、事前に *mts* 遺伝子発現量が上昇する可能性があり、環境モニタリング解析により確認されれば、2-MIB 発生に対応する早期計画を立案・実行が可能となる。

2) カビ臭物質産生藍藻類の簡易識別法・定量法の開発

ジェオスミン産生藍藻類である *Dolichospermum* sp. (*Anabaena* sp.) は、ジェ

オスミン産生株と非産生株が、水源においてそれぞれ高密度で発生するため、管理している水源にて確認された *Dolichospermum* sp. (*Anabaena* sp.) が産生株なのか非産生株なのかを判別することは、極めて重要である。しかしながら、形態観察では判別が困難であり、簡便な方法での判別が求められている。ジェオスミン産生株の指標としては、ジェオスミン合成酵素遺伝子 *geoA*、PCR のポジティブコントロールとしても 16S rRNA 遺伝子を標的として、DNA 抽出を必要としない multiple whole-cell PCR 法を実施した。この結果、*geoA* 遺伝子ホモログと 16S rRNA 遺伝子の増幅を確認した。PCR 法をこれまでに実施したことがない未経験者に講習の上、本試験を実施して頂いたところ、同様に結果を得ることができた。このため、講習後であれば未経験者も実施できる試験法と期待できる。

今後は、検出感度の向上やジェオスミン産生藍藻類の半定量法の確立および本手法を用いた環境モニタリングの実施、2-MIB 産生藍藻類の識別法を確立していく必要がある。

E. 結論

カビ臭物質産生微生物個体群数の増加とカビ臭物質濃度の間には正の相関関係があり、個体群を定量することで、カビ臭発生予測を可能となることが推測された。カビ臭物質の局在は、ジェオスミンは細胞内に、2-MIB は細胞外（溶存態）に多く存在することが明らかになった。以上は、浄水処理プロセスの管理に資する知見である。一方、水源におけるジェオスミン産生株のモニタリングのために、形態観察では困難なジェオスミン産生藍藻類の識別に有効と期待できる multiple whole-cell PCR 法を開発した。本手法は、半定量的な手法へと発展も可能であることから、qPCR 装置を導入していない施設においても有効な手法となると期待できる。

G. 研究発表

- 1) 論文発表
該当なし

2) 学会発表

- (1) 清水和哉、穠山紗耶、月野慎也、Hanchen Miao, 内海真生、秋葉道宏. 第 55 回日本水処理生物学会年会;2017年11月;大阪. 要旨集 pp.19

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) Auffret M., Pilote A., Proulx É., Proulx D., Vandenberg G., and Villemur R. (2011) Establishment of a real-time PCR method for quantification of geosmin-producing *Streptomyces* spp. in recirculating aquaculture systems. *Water Research* **45**(20), pp.6753-6762.
- 2) Su M., Gaget V., Giglio S., Burch M., An W., and Yang M. (2013) Establishment of quantitative PCR methods for the quantification of geosmin-producing potential and *Anabaena* sp. in freshwater systems. *Water Research* **47**(10), pp. 3444-3454.
- 3) Wang Z. and Li R. (2015) Effect of light and temperature on the odor production of 2-methylisoborneol-producing *Pseudanabaena* sp. and geosmin-producing *Anabaena ucrainica* (cyanobacteria). *Biochemical Systematics and Ecology* **58**, pp. 219-226.
- 4) Wang Z. Xu Y., Shao J., Wang J. and Li R. (2011) Gene associated with 2-methylisoborneol biosynthesis in

- cyanobacteria: isolation, characterization, and expression in response of light. PLoS One **6**(4), pp. e18665.
- 5) Zhang T., Li L., Song L. and Chen W. (2009) Effect of temperature and light on the growth and geosmin production of *Lyngbya kuetzingii* (Cyanopytha). Journal of Applied Phycology **21**(3), pp. 279-285.
- 6) Schrader KK. and Blevins WT. (2001) Effect of carbon source, phosphorus concentration, and several micronutrients on biomass and geosmin production by *Streptomyces halstedii*. Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology **26**(4), pp. 241-247.
- 7) Schrader KK. and Blevins WT. (1999) Effects of selected environmental conditions on biomass and geosmin production by *Streptomyces halstedii*. The Journal of Microbiology **37**(3), pp. 159-167.
- 8) Komatu M., Tsuda M., Omura S., Oikawa H., and Ikeda H. (2008) Identification and functional analysis of genes controlling biosynthesis of 2-methylisoborneol. Proceedings of the National Academy of Sciences, **105**(21), pp. 7422-7427.
- J. 謝辞
神奈川県企業庁北村壽朗氏、川崎市上下水道局藤瀬大輝氏に感謝いたします。

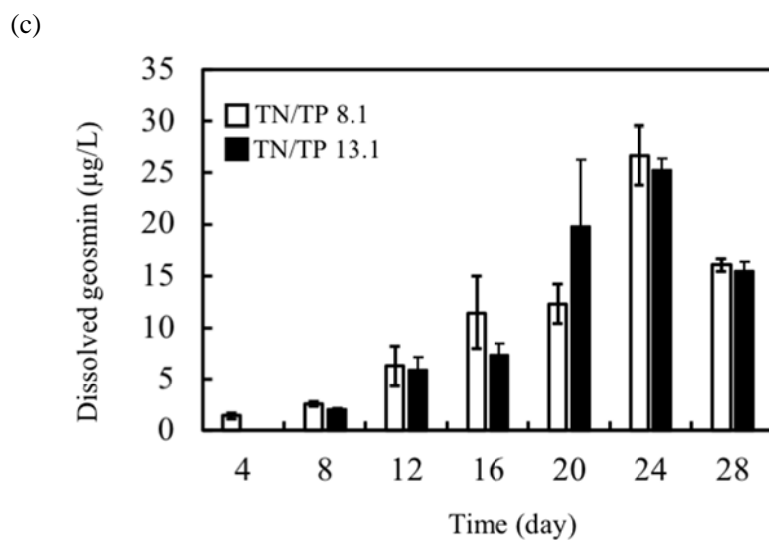
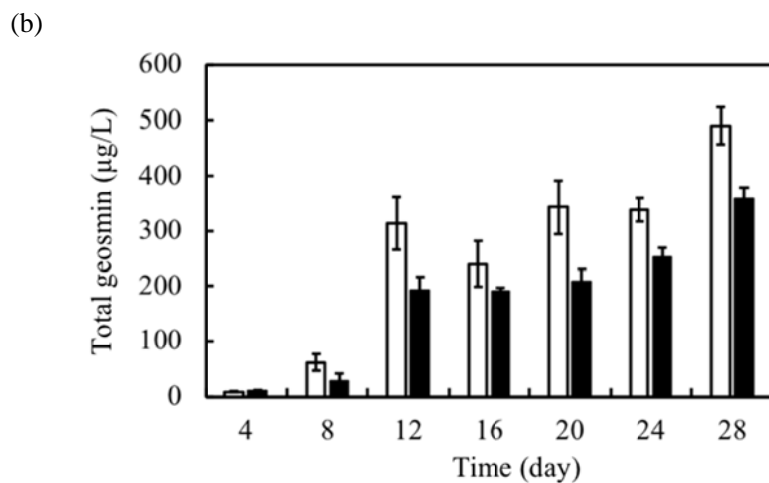
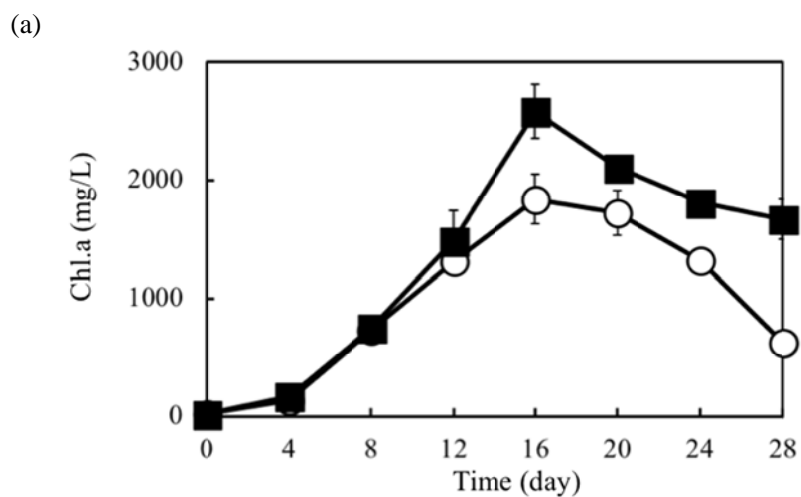
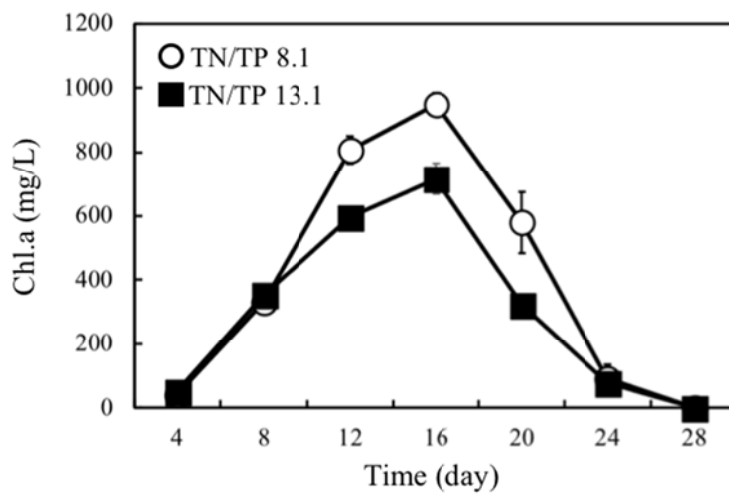
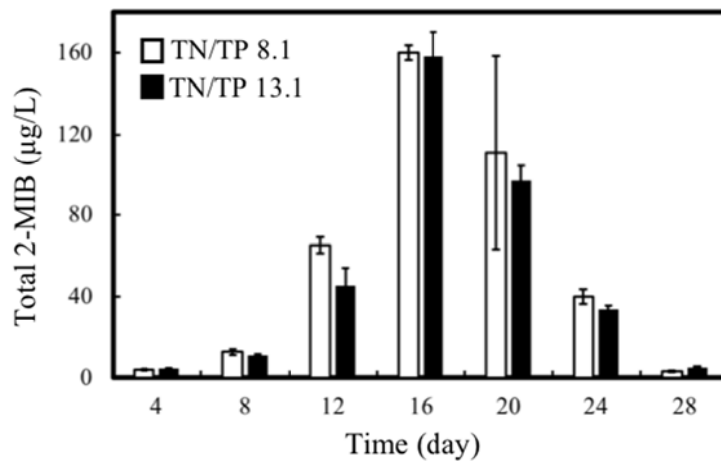


図1 *D. smithii* NIES-824 の増殖とジェオスミン産生
 (a) *D. smithii* の増殖曲線、(b) 総 geosmin 濃度、(c) 溶存 geosmin 濃度

(a)



(b)



(c)

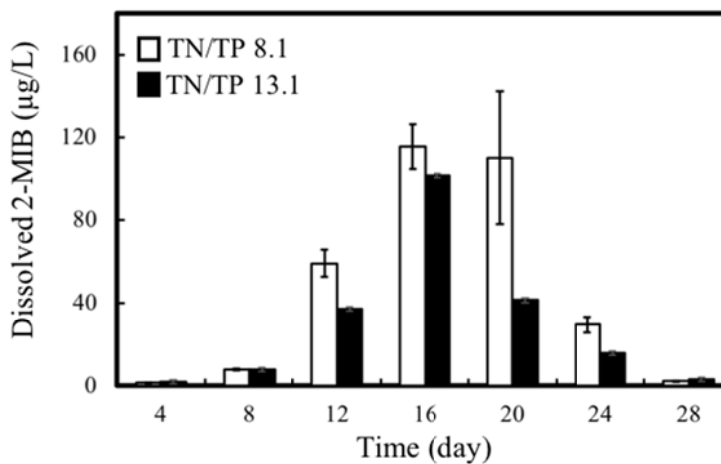


図 2 *P. galeata* の増殖と 2-MIB 産生

(a) *P. galeata* の増殖曲線、(b) 総 2-MIB 濃度、(c) 溶存 2-MIB 濃度

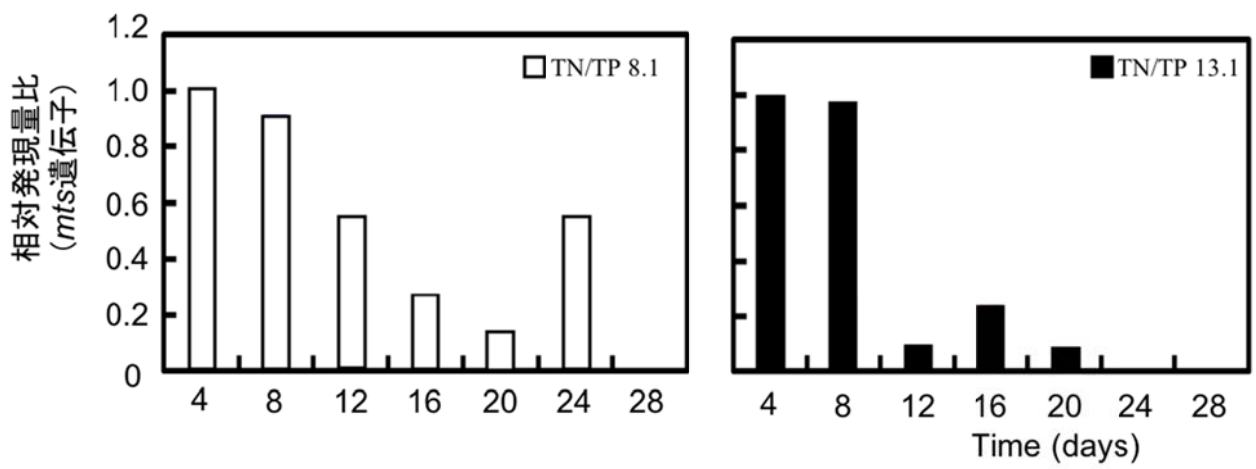


図3 *mts* 遺伝子の発現量変化

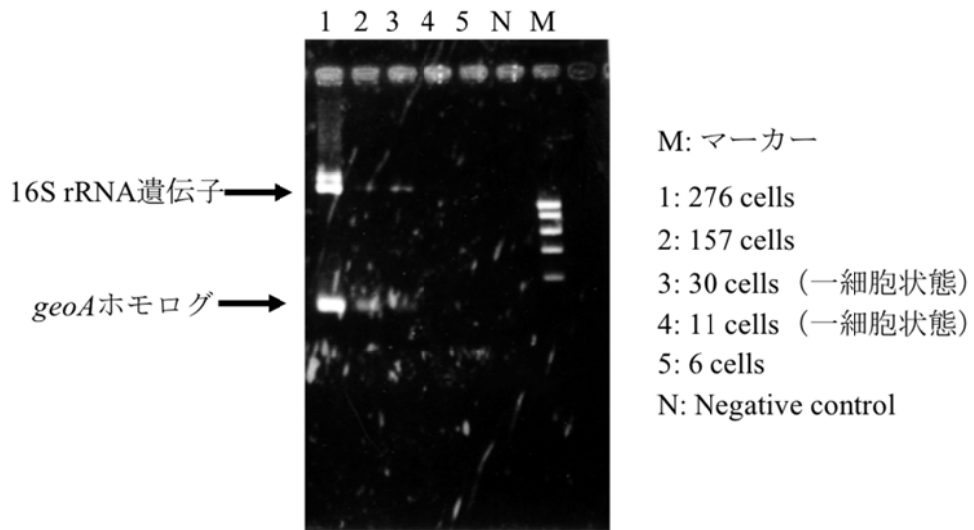


図 4 Whole Cell PCR
 講習後の未経験者が実施した結果

大規模災害および気候変動に適応した 活性炭処理システムに関する検討

研究代表者	秋葉 道宏
研究分担者	下ヶ橋 雅樹
研究協力者	越後 信哉
研究分担者	高梨 啓和
研究協力者	安井 大貴

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)
「大規模災害および気候変動に伴う利水障害に対応した環境調和型
水道システムの構築に関する研究」
分担研究報告書

研究課題：大規模災害および気候変動に適応した活性炭処理システムに関する検討

研究代表者 秋葉 道宏 国立保健医療科学院 統括研究官
研究分担者 下ヶ橋 雅樹 国立保健医療科学院 上席主任研究官
研究分担者 越後 信哉 国立保健医療科学院 上席主任研究官
研究分担者 高梨 啓和 鹿児島大学大学院理工学研究科准教授 准教授
研究協力者 安井 大貴 国立保健医療科学院 研究生

研究要旨

本研究では、異臭味対策として広く使用される粉末活性炭（粉炭）に注目し、(I)様々な条件での粉炭の異臭味原因物質吸着特性を実験的に明らかとして、その合理的な使用率決定のための基礎情報を整理すること、ならびに、(II)代表者らがこれまで作成してきた浄水薬品調達データベースをもとに、活性炭調達のエネルギー消費量評価や災害時の脆弱性を評価するためのデータベースに発展させることを目的とした。(I)については、全国21か所の水道原水中での2-MIBの粉炭への平衡吸着量を実測し Freundlich 式で整理したところ、 $1 \mu\text{g/L}$ の2-MIB平衡濃度下では、超純水中に比べて、水道原水では平衡吸着量が38~75%に低下することがわかった。また、励起波長220 nm/蛍光波長415 nmの蛍光強度と吸着量低下に比較的高い線形相関関係がみられた。吸着前後のEEMの変化、及び分子量分布測定の結果から、分子量1~3 kDa程度のEx220/Em415付近に特徴的なピークを有する有機物が、水道原水中での2-MIB平衡吸着に対する競合成分の一つと推測された。また、5種類の粉炭に対するGeosminと2-MIBの吸着量を確認したところ、Geosminのほうが吸着されやすいことが確認された。また、石炭系粉炭では、構造の違いが吸着質に与える影響の違いの可能性が示唆された。さらに、各浄水場と活性炭の生産能力を可視化するデータベースを作成した。また、このデータベースを活用して、各自治体における薬品調達の脆弱性を評価する手法を確立した。

A. 研究目的

温暖化による流域水温の上昇や、連続的な少雨による水質の悪化は、水道障害生物の生育を活性化し、結果として異臭味原因物質の生成を促す懸念がある。異臭味原因物質除去対策としては、オゾン-活性炭処理の他、粉末活性炭（粉炭）の投入が広く行われているが、その使用に伴う環境負荷が高く[1]、そのコスト削減とあわせて、合理的な使用率の決定が求められている。また、粉炭は

突発的な水質事故の対応にも用いられるものであり、大規模災害時の調達の脆弱性についても把握しておくことが重要である。

本研究では、(I)粉末活性炭の異臭味原因物質吸着特性を実験的に明らかとして、その合理的な使用率決定のための基礎情報を整理すること、ならびに、(II)代表者らがこれまで作成してきた浄水薬品調達データベース[2]をもとに、活性炭調達の脆弱性を評価するためのデータベースに発展させることを目的とした。(I)については、(a)水道原水

中での 2-メチルイソボルネオール (2-MIB) の粉末活性炭への吸着特性の把握と、(b)様々な粉末活性炭への 2-MIB とジェオスミン (Geosmin) の吸着挙動を実験的に明らかとした。(II)については、国内の活性炭生産能力を把握し、浄水場とあわせて可視化するデータベースを作成するとともに、活性炭入手における脆弱性の評価手法の確立を試みた。

B. 研究方法

(I)-a 水道原水中での 2-MIB 平衡吸着挙動

水道原水は全国 21 浄水場 (北海道 2, 東北 2, 関東 6, 中部 2, 近畿 5, 中国 1, 九州沖縄 3) において、平成 29 年 9 月 14 日から 26 日の間に採取されたものを用いた。それぞれ A~U とコード名を付したが、後述の結果も含めて、表 1 に示す。各浄水場にてガラス瓶に水道原水を満水の状態で採取し、冷蔵便にて国立保健医療科学院に送付し、4℃にて使用時まで冷暗保存した。吸着実験に際しては、遠心分離器 (テーブルトップ遠心機 4000, 久保田商事) により 3000 rpm で 10 分間遠心分離した後、上清を採取して使用した。

粉炭は日本水道協会規格に適合した市販の木質系粉炭で、50 %粒子径 14.8 μm, 細孔表面積 1,162 m²/g (窒素吸着, BET), 0.41 nm に細孔容積ピーク (窒素吸着, HK プロット) を有するものを使用した。購入後、室温にて保存し、吸着実験及び粒径分布測定には特段の前処理は行わずに供した。細孔分布測定には、ロータリーポンプ真空乾燥下 100℃にて一晩処理した後、ターボ分子ポンプ真空乾燥下 300℃にて 8 時間処理したものを用いた。

超純水を用いた実験や試料の希釈には、超純水製造装置 (MilliQ A10, Millipore) によって製造した水を用いた。2-MIB は、2-メチルイソボルネオール標準原液 0.1 mg/mL-メタノール溶液 (関東化学) を 1,000 μg/L となるように超純水で希釈し、2-MIB 保存溶液とした。

平衡吸着量は、固相マイクロ抽出-ガスクロマトグラフ-質量分析法 (SPME-GC/MS) 用のバイアル瓶を用いた簡便な方法を採用した。まず、粉炭を 0.1 mg から 2 mg の範囲で概ね対数的に等間隔となるように段階的に精秤し、SPME 用バイア

ル (20 mL, Agilent Technology) にそれぞれ添加した。ここに、バイアル瓶内の 2-MIB 濃度が 100 μg/L となるように超純水または各水道原水 9 mL 及び 2-MIB 保存溶液 (1,000 μg/L) 1 mL を加え、すみやかにクリップキャップ (10/20mL 用, Agilent Technology) でバイアルを密栓した。その後概ね 25℃程度の室温下で往復振とう機 (SR-2, TAITEC) を用いて 100 r/min の速度で 24 時間水平振とうした。また、対照として粉炭を添加せずに超純水及び各水道原水 9 mL に 2-MIB 保存溶液 1 mL を加え、上記と同様の操作を行った。

振とう後は、SPME-GC/MS システム (Agilent 5973C GC/MSD, Agilent 及び Multiple Sampler MPS, Gerstel) を用いて、表 2 に示した条件により各試料水の 2-MIB 濃度を測定し、式(1)から吸着量を算出した。

$$q = (C_0 - C) / W_{pac} \dots \dots \dots (1)$$

ここで q は活性炭への吸着量 (μg-吸着質/mg-活性炭), C は粉炭処理後における 2-MIB 濃度 (μg/L), C₀ は対照水 (粉炭無添加) における 2-MIB 濃度 (μg/L), W_{pac} は添加した活性炭添加濃度 (mg/L) である。なお、カビ臭原因物質の標準測定法で行われる NaCl, 内部標準液の添加, サンプルの加温, 及び SPME 装置での攪拌は、吸着平衡への影響を避けるために行わなかった。

振とう終了から 2-MIB 濃度測定までにかかる時間は試料により異なり、24 時間の振とうで吸着平衡に達していなければ、同条件での比較ができなくなる。そこで、測定終了後の試料を適宜翌日再測定して濃度変化がないことを確認した。

この平衡吸着実験で得られた結果は Freundlich 式 (式(2)) にて整理した。

$$q = kC^{1/n} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、q は活性炭への平衡吸着量 (μg-吸着質/mg-粉炭乾燥重量), C は平衡濃度 (μg/L), k 及び 1/n は吸着定数である。なお、粉炭の乾重は、使用した粉炭を 105℃で 2 時間以上乾燥させて含水率を測定して算出した。

また、水道原水中のどのような成分が 2-MIB の活性炭吸着に対して競合を引き起こすのかを明らかにするため、遠心ろ過後の各原水の pH, 全有機炭素 (TOC), 紫外 254 nm 吸光度 (λ₂₅₄) 及び三次元蛍光マトリックス (EEM) の測定を行っ

た。pHはpHメーター(LAQUA F-74, 堀場製作所)を用いて測定した。TOCは、全有機炭素計(TOC-V CPH, 島津製作所)を用いて不揮発性有機炭素(NPOC)を測定し、TOC値を求めた。 λ 254測定は、分光光度計(UV-1800, 島津製作所)を用いて、1 cm石英セルで254 nmの吸光度を測定した。EEM測定には3次元蛍光測定装置(Aqualog, 堀場製作所)を用い、励起波長を220~800 nm, 増分3 nm, 蛍光波長を150.34~926.16 nm, 増分2.33 nmとして測定した。また、硫酸キニーネ標準液(10 μ g/L)を用いて蛍光強度の相対化を行った。

さらに、Freundlich式パラメータkと蛍光強度(励起220 nm, 吸収415 nm, Ex220/Em415)を参考とし、それぞれ最低値及び最高値となったPを含めてサンプル全体を網羅する代表的な4つの水道原水(I, P, T, U)について、粉炭処理によるEEM変化の測定、及びゲルクロマトグラフィーによる分子量分画を行った。

EEM測定では、50 mLの樹脂製遠心管(Centrifuge Tube, IWAKI)に、それぞれの原水を40 mL、及び粉炭を3.6 mg(乾燥重量)添加し、約25°Cの室温下で24時間往復振とうを行った。粉炭処理前後に、EEMを測定して比較した。なお、EEM測定にあたっては事前に孔径0.45 μ mのメンブランフィルター(Millex-LH, Millipore)によりろ過した試料を用いた。

分子量分画では、低温高温水槽(PFR1000, EYELA)及び凍結乾燥機(FDU-2100, EYELA)を使用して、1 Lの原水を約40 mLに凍結乾燥濃縮し、膨潤度12~15, 分画分子量範囲3~80 kDAのゲル(Sephadex G-75Fine, GEヘルスケアジャパン)を上部、膨潤度4~6, 分画分子量範囲1~5 kDAのゲル(Sephadex G-25Fine, GEヘルスケアジャパン)を下部とする2層構造として充填した内径26 mm, 長さ300 mmのカラムを用いて分画した。濃縮した原水試料をカラム上部から10 mL滴下し、ペリスタティックポンプ(PST-100, IWAKI)及びフラクションコレクター(FRACTION COLLECTOR FRC-2120, IWAKI)を用いて1 mL/minの速度で5 mLずつ分画を行い、合計40本の分画試料(フラクション)を得た。また、分子量マーカーとして平均分子量3 kDaのポリエチレングリコール(PEG3,000: ポリエチレングリコ

ール4,000 和光1級, 和光純薬工業)及び分子量1 kDaのポリエチレングリコール(PEG1,000: ポリエチレングリコール1,000 和光1級, 和光純薬工業)の分画を行い、溶出位置を確認した。得られたフラクションはTOC測定を行った。また、代表的なフラクションについてはEEM測定も行った。

(I)-b 様々な粉炭でのカビ臭原因物質吸着挙動

粉末活性炭は、原料や粒径分布の異なる5種類a~eを用いた。このうち、a, b及びdは粉末活性炭として販売されているものをそのまま使い、c及びeは粒状あるいは顆粒状として販売されているものを粉砕し使用した。粒度分布はレーザー回折式粒度分布測定装置(SALD-3100, 株式会社島津製作所)を用いて測定した。Geosmin及び2-MIBは水質試験用(関東化学㈱, 0.1 mg/mL-メタノール溶液)を超純水で希釈したものをを用いた。それぞれの物理学的特性を表4に示す。吸着平衡量は、(I)-aと同様に、固相マイクロ抽出ガスクロマトグラフィー質量分析(SPME-GC/MS)用のバイアル瓶に活性炭を0.03~7.1 mg-dryの範囲で適当な間隔において精秤、添加し、Geosminあるいは2-MIB 100 μ g/L溶液を10 mL加えた。その後、25°Cにて24時間以上往復振盪した後に、25°CにてSPME-GC/MSシステムを用いて分析した。分析条件は(I)-aと同じく表2のとおりである。分析結果はFreundlich式(式(2))で整理した。また、参照として、フェノールの吸着平衡も測定した。フェノール濃度は分光光度計(UV-1800, 島津製作所)を用いて270nmの吸光度で測定した。

(II) 粉炭の調達に関する脆弱性の評価

今回の検討では、粉末活性炭の製造量の集計が入手できなかったため、活性炭としての生産能力を示すこととした。平成14年度から平成26年度の都道府県別の活性炭産出事業者数、出荷金額、出荷数量を化学工業統計[5]から得た。また、秘匿データのない事業者数については、この期間の年平均産出事業者数を計算し、計算結果をGISにて表示した。また、全国の浄水場については、所在地、施設能力、平均配水量のデータ全国浄水場ガイド[3]から得た。所在地のGISマッピングには、東京大学のアドレスマッチングサービス[4]を用い、作図にはArcMAP 10.2.2 (ESRI Japan)を用いた。

調達における脆弱性の評価デモンストレーションは、浄水場 3 ヶ所(X, Y:本州, Z:本州以外)を想定して行った。活性炭工場は、化学工業会社録[5]ならびに現有の浄水薬品データベース[2]を参照として、判明分のみを対象とした。各浄水場からそれぞれの活性炭工場までの距離及び移動時間を、Google マップ[6]にて計算し、それぞれの浄水場から近い順にならべて、グラフにて表現した。

C. 研究結果及び D. 考察

(D)-a 水道原水中での 2-MIB 平衡吸着挙動

超純水及び水道原水 21 試料(A~U)から得られた、pH, TOC, λ_{254} , Freundlich パラメータの結果は、表 1 に記している。なお、24 時間振とう後に 2-MIB 濃度測定を行った後、その翌日に同サンプルの 2-MIB の濃度を適宜測定したが、前日との測定値の差は 5~10 %程度であり、測定誤差と同程度であったため、24 時間振とうにより平衡濃度にはほぼ達したと判断した。

試料における吸着等温線を図 1 に示す。吸着等温線は、検体数が多く混成を避けるため、3つの原水種別に分けて示す。また、図中には決定係数を示すが、水道原水によって実験点数に違いがあることから、ここでの決定係数は自由度調整済み決定係数(R^2)とする。今回の研究では、吸着等温線は少なくとも 4 プロット以上から作成している。その R^2 値をもって再現性を判断した。その結果、ほとんどの系で R^2 値が 0.8 を超え、最低の N においても 0.68 であり、妥当な再現性を有していると判断した。

2-MIB 飽和濃度 $1\mu\text{g/L}$ に対する平衡吸着量 ($\mu\text{g/mg}$)を示す Freundlich 式パラメータ k は、表 2 のとおり、超純水が 3.09 であった。これに対してすべての水道原水の k は超純水のそれよりも低い値となっており、最低は水道原水 P で 1.18, 最高でも原水 K で 2.32 と、超純水の 38 から 75%の値となった。

原水水質と Freundlich 式パラメータ k の関係を図 2 (pH), 図 3 (TOC), 図 4 (λ_{254}) に示す。なお、図中に示す決定係数 R^2 は自由度調整を行っていない。pH については、 k に対する影響はほとんどなかった。一方、TOC, λ_{254} ともに値が高くなると k が低下する、つまり 2-MIB の吸着量が低下する傾向にあり、TOC では、 $R^2=0.19$ (超純水を含めると 0.39), λ_{254} では、0.26 (超純水を含めると 0.40) となった。このことから、原水中の有機物が 2-MIB の吸着量を低下させてい

るものと推測される。

EEM については、全ての原水において Ex220/Em415 付近に特徴的なピークが確認された。Ex220/Em415 と Freundlich 式パラメータ k との関係を図 5 に示す。さきの TOC や λ_{254} と同様に、Ex220/Em415 の増加に伴い 2-MIB 粉炭吸着量の低下がみられた。またその相関性は、TOC, λ_{254} と比較して高かった ($R^2=0.30$ (超純水を含めると 0.51))。

以上のことから、溶存有機物、特に λ_{254} や、Ex220/Em415 の高い物質が、粉炭の 2-MIB 平衡吸着において競争的に働くことがわかった。また、Ex220/Em415 における蛍光強度で最も高い相関性が確認され、粉炭必要量の予測を行ううえで適した指標であると考えられた。

水道原水 I, P, T, U における粉炭処理前後の EEM の変化は、強度の差はあるものの同じ傾向を示した。一例として水道原水 P の粉炭処理前後の EEM の結果を図 6 に示す。上段は粉炭処理前、下段は処理後の EEM 画像である。また、吸着前後の TOC 及び EEM 強度 (対象波長 $\pm 10\text{nm}$ の強度平均値) の変化を表 3 に示す。先述のとおり粉炭処理前の水道原水は Ex220/Em415 周辺を中心に蛍光強度ピークがみられ、粉炭処理後は、それが大きく減少している。さらに、表 3 のとおり TOC の除去率に対して Ex220/Em415 の除去率が 1.4~2.1 倍程度高くなっている。このことから、Ex220/Em415 付近の成分が優先的に吸着され、2-MIB との競合吸着に関わっている可能性が示唆された。

さらに、水道原水 I, P, T, U の分子量分画による各フラクションの TOC 測定結果を図 7 に示す。4 種の水道原水で共通してフラクション No.25 前後の位置に TOC のピークが現れた。PEG3000, PEG1000 の測定結果から分子量 3 kDa 及び 1 kDa がフラクション No.18, No.28 の位置にあることを確認しており、これらの水道原水でみられた TOC ピークは 1~3 kDa 程度の比較的低い分子量を持つことが分かった。また、各水道原水を濃縮した試料全体に占めるフラクション No.18~28 の TOC の割合は 20~46%であった。

フラクション No.18~28 の TOC 合算値、すなわち 1~3 kDa 程度の分子の存在量と Freundlich 式パラメータ k の関係を図 8 に示す。試料が 4 点と少ないが、1~3 kDa 程度の分子の存在量とパラメータ k の間には相関があり、この範囲の分子量の物質が多く存在すると 2-MIB の粉炭吸着量を低下させることが示唆

された。

以上より, Ex220/Em415 付近に特徴的なピークを有する, 分子量 1~3 kDa 程度の有機物が, 水道原水中での 2-MIB 平衡吸着に対する競合成分の一つと推測された。

(I)-b 様々な粉炭でのカビ臭原因物質吸着挙動

2-MIB, Geosmin, 及びフェノールの吸着等温線を図 9(石炭系粉炭), 及び 10(木質・ヤシ殻系粉炭)に示す。また, Freundlich 式にフィッティングした場合の各パラメータを, 表 5 に示す。 Freundlich パラメータ k すなわち $1 [\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}]$ に対する吸着量は, Geosmin の吸着量は 8.2~31.9 $\mu\text{g}/\text{g}$ であったのに対し, 2-MIB は 0.8~3.4 $\mu\text{g}/\text{g}$ であり, 概ね 1 オーダー異なる吸着量となり, 今回使用した活性炭に対しては, Geosmin のほうが吸着除去しやすいことがわかった。また活性炭の種類で見た場合, 石炭系(図 9)では, フェノールと Geosmin では, 粉炭 c のほうが吸着量が多かったが, 2-MIB では粉炭 d のほうが多くなった。粉炭 c と d の物理学的構造を比較すると, 表面積には大きな違いはないが, 粉炭 d のほうが, ミクロ孔に比べてメソ+マクロ孔が多い。この結果から, 2-MIB は石炭系活性炭では, より粒径の小さい, あるいはメソ孔, マクロ孔の多い活性炭での平衡吸着量が多くなった。一方, 木質・ヤシ殻系では, Geosmin, 2-MIB ともに, $a > e > b$ の順で吸着量が多くなった。フェノールについては a と e で測定したが, 両者に差は見られなかった。

(II) 粉炭の調達に関する脆弱性の評価

全国の都道府県別活性炭産出状況ならびにくつかの生産工場, 及び浄水場のデータベースが作成された。このデータベースをもとに作図した, 全国の活性炭産出事業者数及び浄水場位置を図 11 に示す。図より, 浄水場の全国的な広がりに対して, 活性炭製造事業所は, 関東から西日本にかけて多く, 北日本で少ないことがわかる。粉炭は輸入によるものもあり, 必ずしも国内の生産能力だけが供給能力となるわけではないが, 化学工業統計に基づいた形で国内の活性炭供給能力が可視化できた。

また, 各浄水場 X, Y, Z から工場までの距離と輸送時間をそれぞれ図 12, 13 に示した。図より, 浄水場 Z は最も近いところで 1,370 km, 時間として 32 時間を要し, その調達におけるエネルギーが高いことがわかる。一方, X, Y を比較し

た場合, X は 5 時間以内に 9 ヶ所の工場があるのに対して, Y は 5 ヶ所である。大規模災害の状況により解釈は異なるが, 例えば道路の寸断等により, 最寄りの工場からの調達が困難となった場合には, Y のほうが X より脆弱であるといえる。

ここで示したものは調達方法のデモンストレーションであり, 工場については今回情報が入手できたもののみを対象としている。さらに詳細な検討には, 今後, 工場に関する情報をアップデートする必要があるが, 災害に対する脆弱性評価のための活性炭の生産と需要のデータベースの構築とあわせ, その評価手法を例示することができた。

E. 結論

(I)-a 水道原水中での 2-MIB 平衡吸着挙動

全国 21 か所の水道原水中での 2-MIB の粉炭への平衡吸着量を実測し Freundlich 式で整理したところ, 1 $\mu\text{g}/\text{L}$ の 2-MIB 平衡濃度下では, 超純水中に比べて, 水道原水では平衡吸着量が 38~75%に低下した。また, 励起波長 220 nm/蛍光波長 415 nm の蛍光強度と吸着量低下に比較的高い線形相関関係がみられた。また, TOC, λ_{254} についてもある程度の相関性がみられた。さらに, 4 か所の水道原水における吸着前後の EEM の変化, 及び分子量分布測定の結果から, 分子量 1~3 kDa 程度の Ex220/Em415 付近に特徴的なピークを有する有機物が, 水道原水中での 2-MIB 平衡吸着に対する競合成分の一つと推測された。

(I)-b 様々な粉炭でのカビ臭原因物質吸着挙動

5 種類の粉炭に対する Geosmin と 2-MIB の吸着量を確認したところ, Geosmin のほうが吸着されやすいことが確認された。また, 石炭系粉炭では, 構造の違いが吸着質に与える影響の違いが確認でき, 今回用いた 2 種の粉炭では, 2-MIB はより粒径の小さい, あるいはメソ孔・マクロ孔が多い粉炭により多く吸着する傾向がみられた。

(II) 粉炭の調達に関する脆弱性の評価

国内の活性炭生産能力と浄水場の分布を可視化できるデータベースを作成した。また, このデータベースを活用して, 各自治体における薬品調達の脆弱性を評価する手法が例示できた。

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

下ヶ橋雅樹, 藤井隆夫, 高梨啓和, 秋葉道宏. 水道におけるカビ臭物質の吸着に与える活性炭構造の影響, 化学工学会第 83 年会, 2018 年 3 月, 吹田市, 同講演オンライン要旨 O220.

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] 下ヶ橋雅樹, 高梨啓和, 秋葉道宏 (2015) 浄水処理プロセスにおける生物障害のエネルギー環

境負荷, 化学工学会第 80 年会 ; 2015 年 3 月 19 ~21 日, 東京. 要旨集 USB メモリ.

[2] 秋葉道宏, 高梨啓和, 下ヶ橋雅樹 (2015) 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, In 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 26 年度 総括・分担研究報告書 (代表 : 秋葉道宏) p. 65-71.

[3] 全国浄水場ガイド 2016 (水道産業新聞社)

[4] 経済産業省, 工業統計調査. <http://www.meti.go.jp/statistics/tyo/kougyo/result-2.html>

[4] CSV アドレスマッチングサービス (東京大学空間情報科学研究センター) (<http://newspat.csis.u-tokyo.ac.jp/geocode/>)

[5] 化学工業日報社編 (2016) 化学工業会社録 2017 年版.

[6] Google マップ (<https://www.google.com/maps/>)

J. 謝辞

(I-a) においては, 全国の水道事業者から水道原水のご提供をいただきました。また, (I-a) は国立保健医療科学平成 29 年度院水道工学研修の一部として実施し, 当研修の研修生であった新潟市水道局松井利恭氏, 千葉県水道局増田太郎氏, 横浜市水道局鈴木知美氏に全面的な協力を得ました。記して謝意を表します。

表 1 実験に使用した原水とその水質及び Freundlich 式パラメータ

原水種別*	pH	TOC (mg/L)	UV 254nm (-)	Freundlich式 パラメータ	
				k	1/n
超純水	-	ND	ND	3.09	0.56
A ①	7.7	1.5	0.059	1.57	0.41
B ①	7.6	1.2	0.036	1.88	0.37
C ①	7.9	1.5	0.039	2.10	0.48
D ①	7.7	1.1	0.042	1.57	0.43
E ①	7.6	1.1	0.027	1.90	0.40
F ①	7.4	1.2	0.036	1.51	0.35
G ③	7.5	1.4	0.046	1.60	0.41
H ③	7.3	1.0	0.048	1.88	0.50
I ①	7.7	2.1	0.105	1.36	0.47
J ①	7.6	1.1	0.035	1.73	0.35
K ②	7.5	1.9	0.059	2.32	0.62
L ①	7.8	1.4	0.047	1.22	0.34
M ①	7.6	1.4	0.047	1.89	0.49
N ②	7.6	1.6	0.028	1.60	0.36
O ①	7.6	0.9	0.033	1.85	0.50
P ②	8.3	3.5	0.099	1.18	0.36
Q ②	7.6	2.3	0.078	1.57	0.42
R ②	7.4	2.2	0.098	1.48	0.47
S ③	8.0	1.7	0.053	1.53	0.33
T ①	7.8	1.3	0.038	2.20	0.45
U ①	7.7	1.6	0.036	2.01	0.58

* 水道統計⁵⁾をもとに、①:表流水(自流)かつ/またはダム放流、②:湖沼水またはダム直接、③:その他(①と②の混合、及びそれ以外) に分類

表 2 SPME-GC/MS 測定条件

SPME	Multipurpose Sampler MPS (GERSTEL Corp.)
GC/MS	MSD 5983 (HEWLETT PACKARD Corp.)
SPME	ファイバー : 65 μ m PDMS-DVB Coating 試料量 : 10mL 加熱温度 : 25 $^{\circ}$ C 抽出時間 : 30min
GC	カラム : DB-5ms (0.25mm I.D*60m, df=0.1 μ m) 注入法 : スプリットレス 注入温度 : 250 $^{\circ}$ C オープン温度 : 40 $^{\circ}$ C(1min)-(10 $^{\circ}$ C/min)-250 $^{\circ}$ C(1min)
MS	注入口温度 : 250 $^{\circ}$ C イオン源温度 : 230 $^{\circ}$ C モニターイオン : (SIM) 95, 107, 108

表 3 粉炭処理による TOC 及び EEM 除去率比較

	TOC (mg/L)			EEM 220/415			EEM 225/295		
	処理前	処理後	除去率	処理前	処理後	除去率	処理前	処理後	除去率
	I	2.3	1.4	39%	4.8	1.6	67%	1.3	0.9
P	3.9	2.4	38%	5.5	1.2	78%	2.6	1.1	58%
T	1.4	0.5	64%	2.5	0.3	88%	1.3	0.5	62%
U	1.9	0.9	53%	2.3	0.5	78%	0.9	0.2	78%

表 4 (I)-b にて使用した粉炭の粒径, 及び細孔分布

活性炭	材料	d ₅₀ [μm]	ミクロ孔	メソ孔	マクロ孔	BET 表 面積 [m ² /g]
			(d=0.3~2nm) [cm ³ g ⁻¹] (割合%)	(d=2~50 nm) [cm ³ g ⁻¹] (割合%)	(d=50nm~) [cm ³ g ⁻¹] (割合%)	
a	木質	15	0.47 (83)	0.08 (14)	0.02 (3)	1,163
b	木質	9	0.40 (35)	0.60 (53)	0.14 (12)	955
c	石炭	30	0.39 (68)	0.16 (28)	0.02 (4)	970
d	石炭	23	0.39 (78)	0.10 (20)	0.01 (3)	913
e	ヤシ殻	42	0.65 (86)	0.08 (11)	0.02 (3)	1,578

表 5 Freundlich パラメータ

AC	原料	2-MIB		Geosmin		Phenol	
		k	1/n	k	1/n	k	1/n
a	木質	3.43	0.57	31.87	0.81	4.16	0.32
b	木質	1.09	0.37	8.18	0.51	-	-
c	石炭	0.84	0.58	16.37	0.46	8.70	0.28
d	石炭	1.31	0.55	8.78	0.63	8.07	0.23
e	ヤシ殻	2.57	0.65	17.35	0.63	5.10	0.32

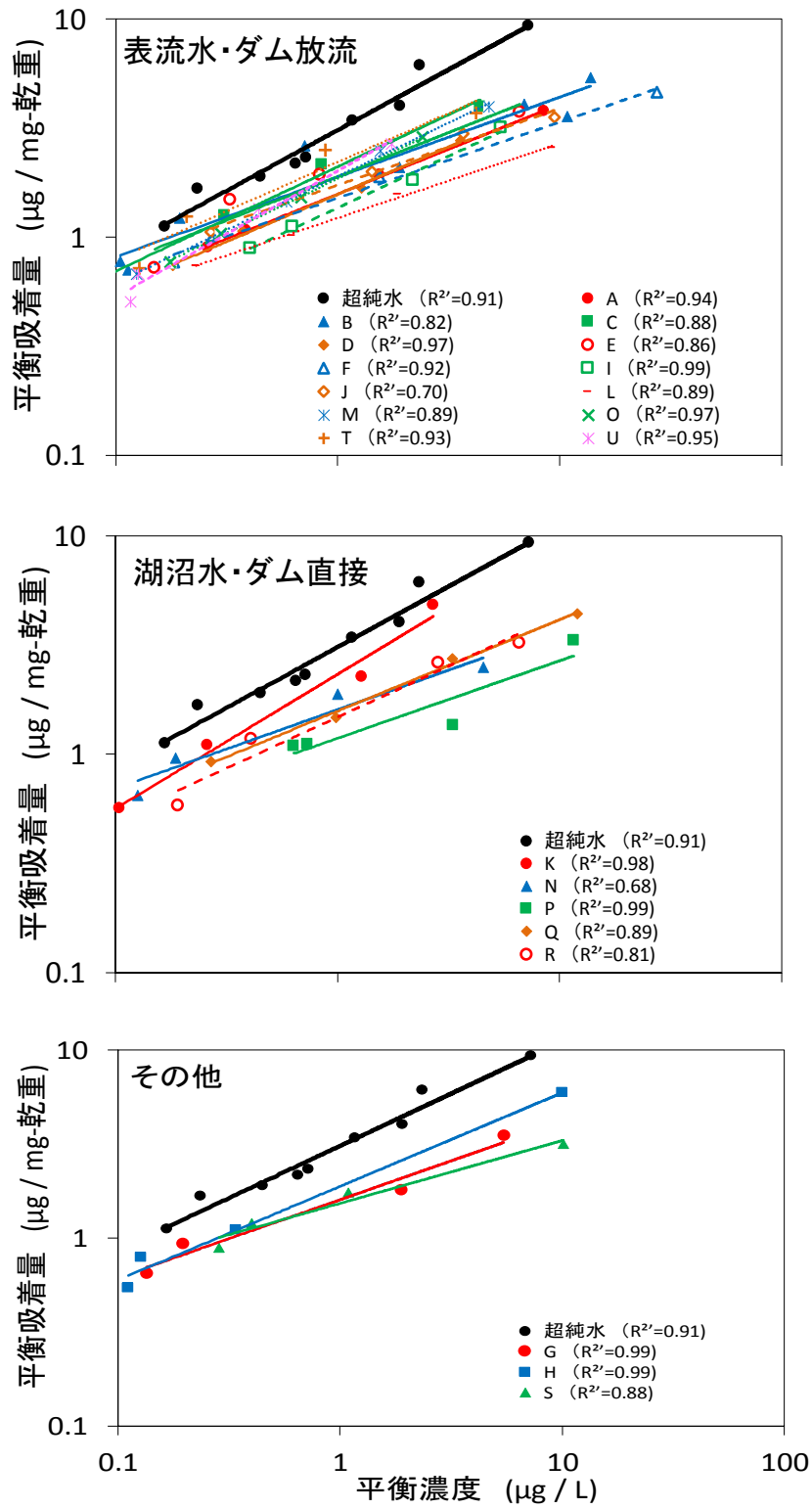


図1 各水道原水中での2-MIB吸着等温線

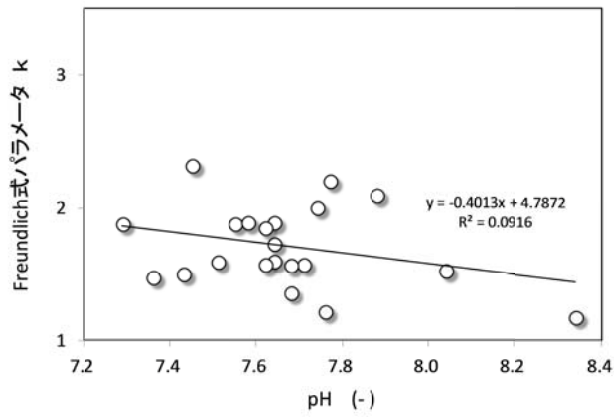


図2 原水 pH と 2-MIB 吸着量の関係

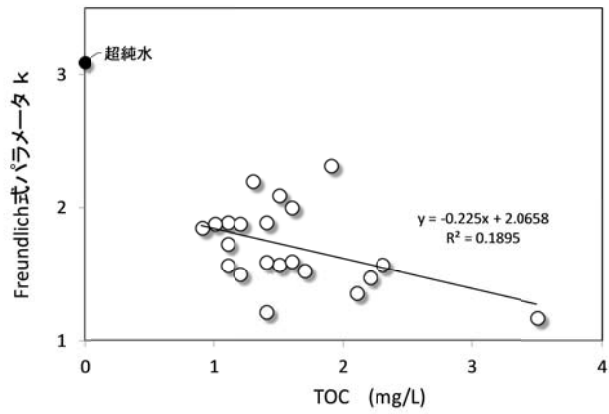


図3 原水 TOC と 2-MIB 吸着量の関係

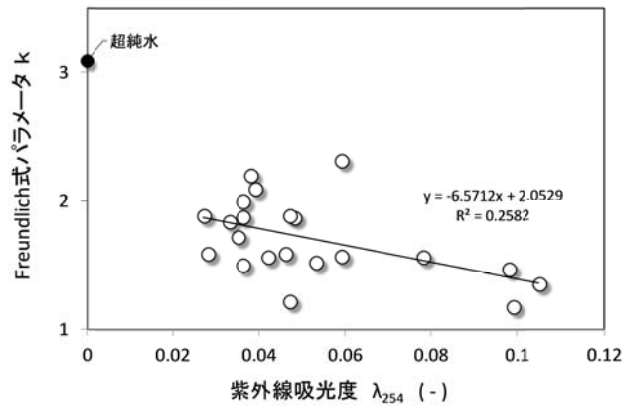


図4 λ_{254} と 2-MIB 吸着量の関係

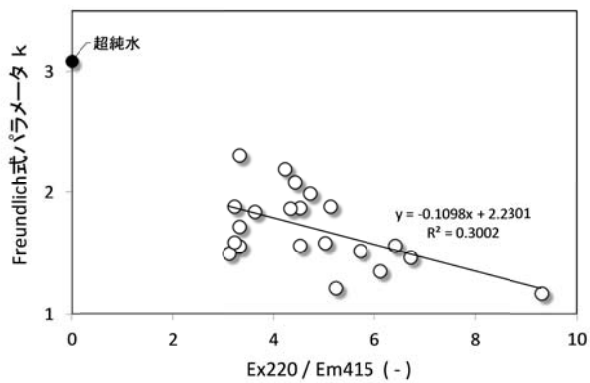


図5 Ex220/Em415 相対蛍光強度と 2-MIB 吸着量の関係

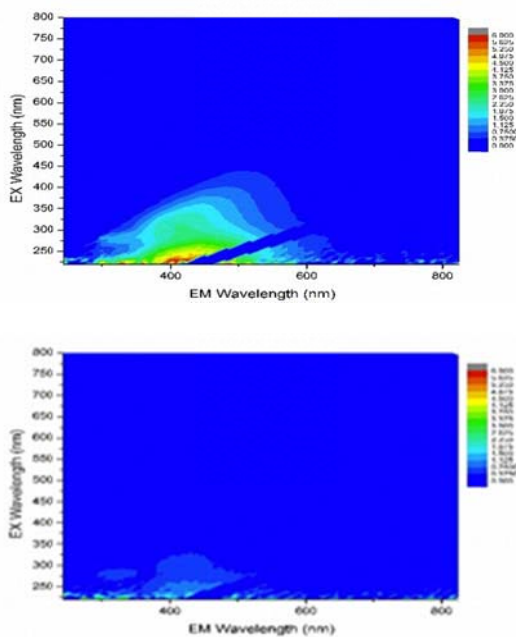


図6 水道原水 P の EEM (上段：粉炭処理前, 下段：粉炭処理後)

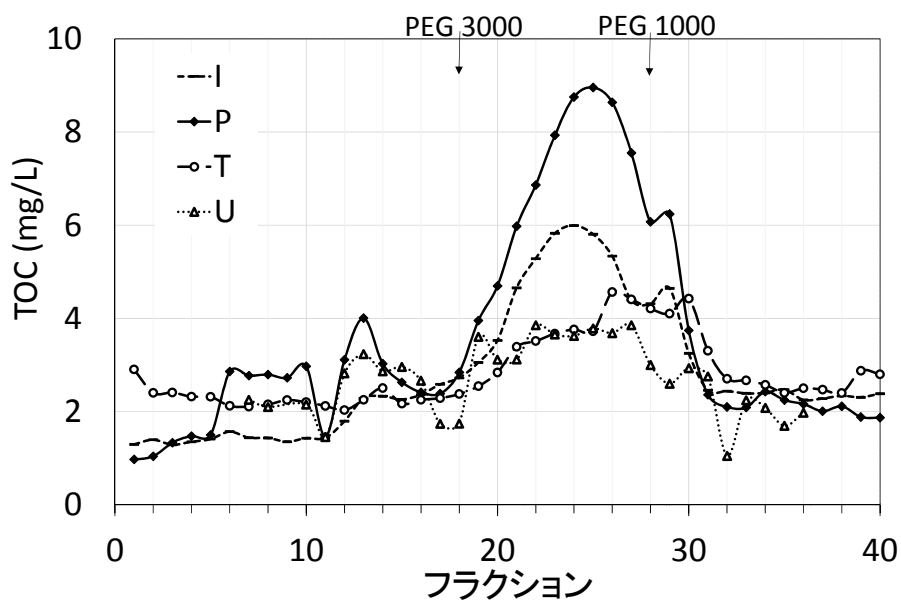


図7 分子量分画でのフラクションごとの TOC

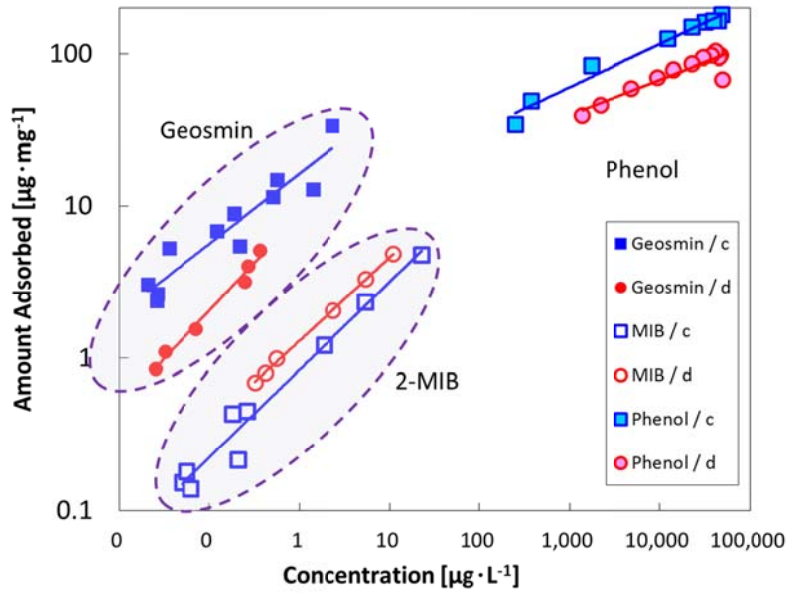


図9 石炭系粉炭への各物質の吸着

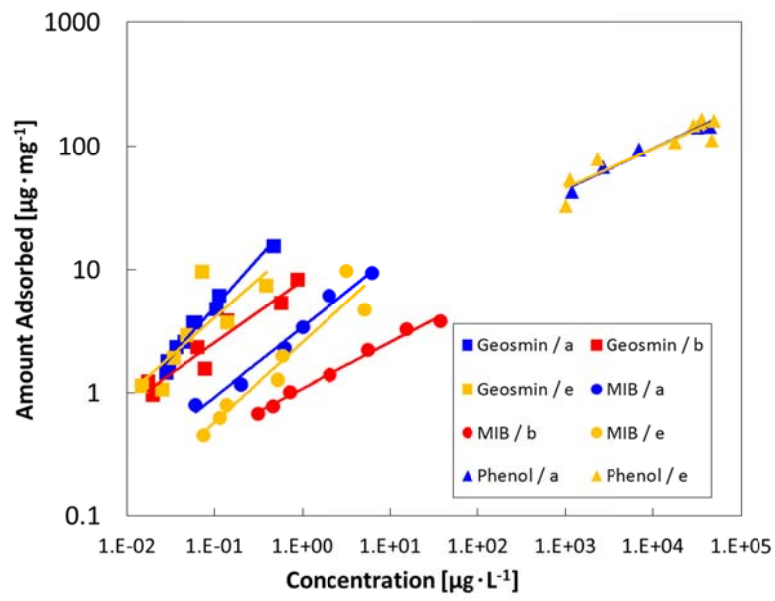


図10 木質・ヤシ殻系粉炭への各物質の吸着

都道府県別事業所数；
H14～H26年度の各年平均

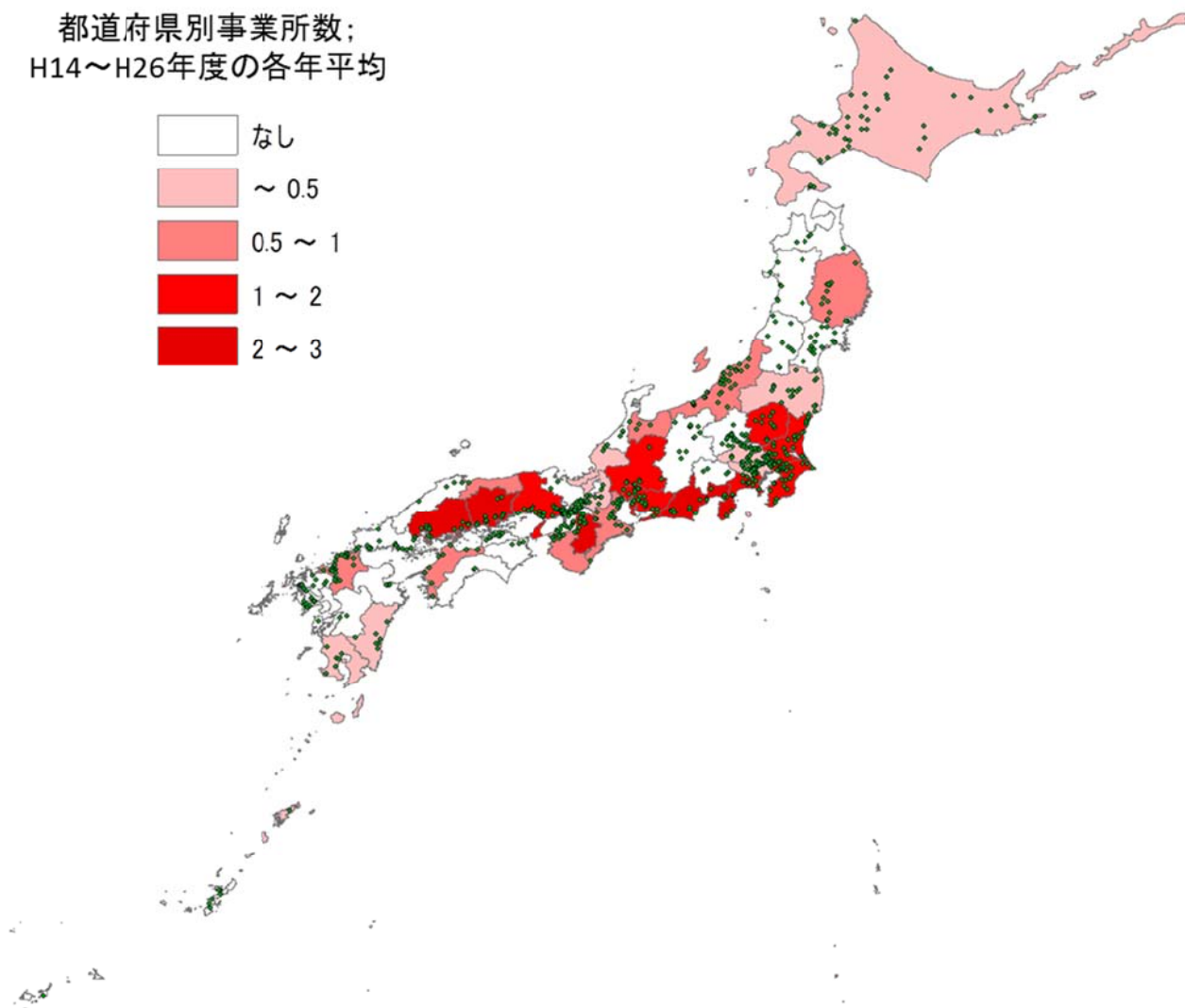
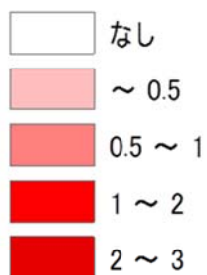
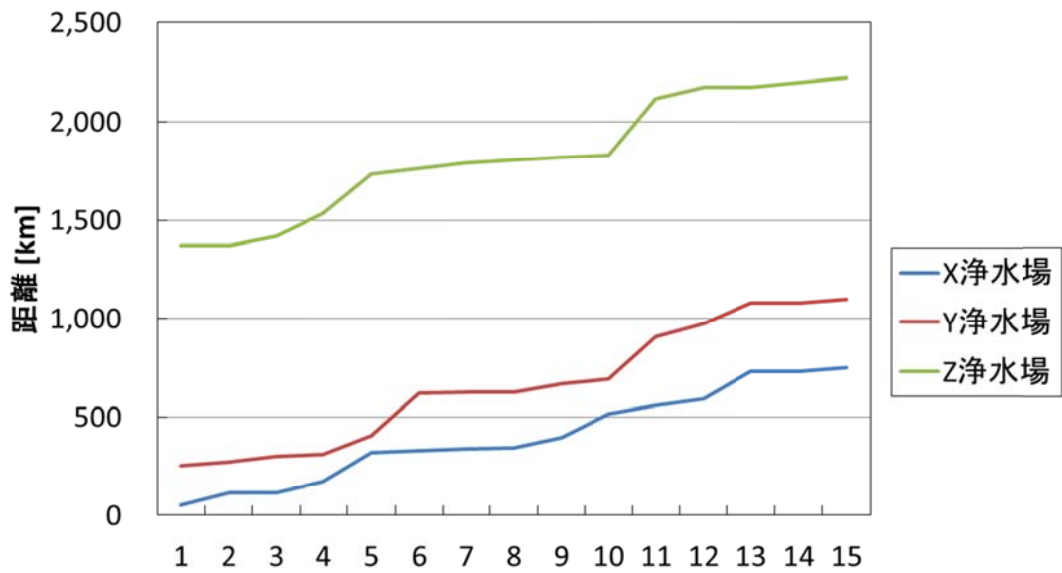
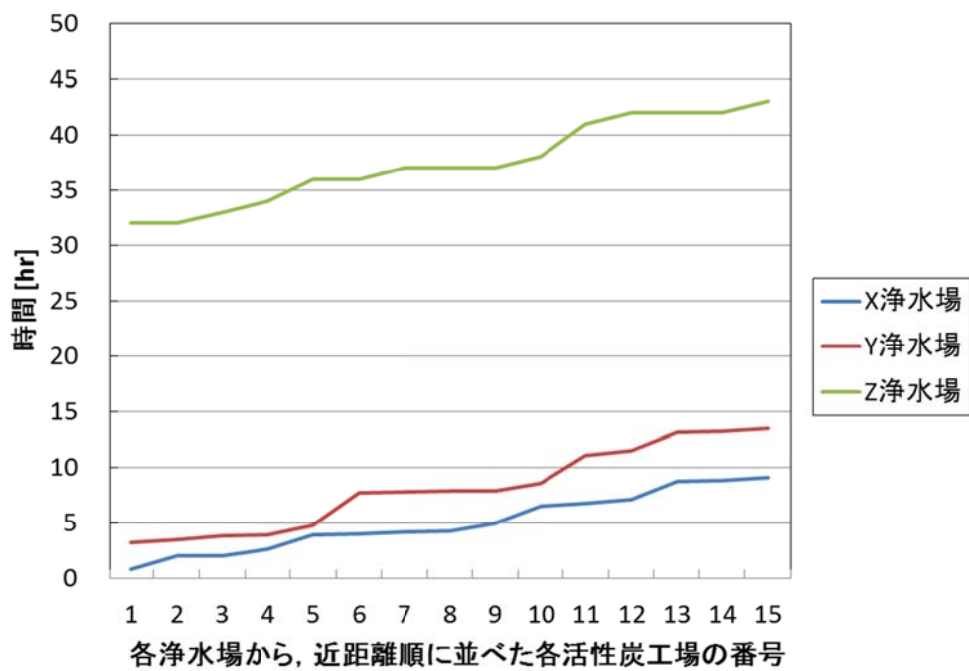


図 11 都道府県別活性炭製造事業所数と浄水場
(※浄水場は全国浄水場ガイド掲載分で膜処理浄水場を除く)



各浄水場から、近距離順に並べた各活性炭工場の番号

図 12 浄水場から活性炭工場までの距離



各浄水場から、近距離順に並べた各活性炭工場の番号

図 13 浄水場から活性炭工場までの輸送時間

平成 28 年台風 10 号による 水道施設被害調査

研究代表者	秋葉 道宏
研究分担者	下ヶ橋 雅樹
研究協力者	三浦 尚之
研究分担者	西村 修
研究協力者	佐野 大輔

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)
「大規模災害および気候変動に伴う利水障害に対応した環境調和型
水道システムの構築に関する研究」
分担研究報告書

研究課題：平成 28 年台風 10 号による水道施設被害調査

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 下ヶ橋 雅樹 国立保健医療科学院 上席主任研究官
研究協力者 三浦 尚之 国立保健医療科学院 主任研究官
研究分担者 西村 修 東北大学大学院工学研究科 教授
研究協力者 佐野 大輔 東北大学大学院工学研究科 准教授

研究要旨

平成 28 年台風 10 号によって甚大な被害をうけた岩手県下閉伊郡岩泉町の視察を行った。取水設備の流出や浄水設備の水没等、同地の水道設備が依存する、山間部の小さな河川の急激な水位変化に伴う被害の大きさを確認した。また、北海道地域での簡易水道での被害と降水の関係を、水源流域を含めた形で可視化することで、水源流域での降水の様子が明らかとなった。さらに、南富良野町幾寅では、今回被害をもたらした降水が、同観測地点の過去 40 年間に例を見ない豪雨であり、気候変動によって増加する懸念のある豪雨対策の重要性が伺えた。

A. 研究目的

気候変動に伴う異常気象や、地震等の大規模災害に適應しうる水道システムの構築は、将来にわたって、安全で快適な水道を継続するうえで重要である。特に近年は、気候変動が起因していると考えられる、異常気象に伴う水道施設損壊の被害が目立ってきている。

平成 28 年 8 月 30 日に台風 10 号が観測史上初めての進路で岩手県大船渡市付近に上陸し、岩手県宮古市や北海道上士幌町では記録的な大雨となった。その結果、取水施設や管路等の損壊や水源の濁りによる断水という深刻な利水障害が起きた¹⁾。昨年度の本研究事業報告書では、市町村ごとに最大断水戸数、断水期間、及び断水原因を整理し、8 月 29～31 日の 3 日間降水量、市町村別の最大断水戸数・断水期間、台風進路、水道給水エリアの情報を地理情報システム (GIS) を用いて統合し、断水被害の分布を解析した。本報告で

は、岩泉町の現地視察により、山間部溪谷の取水施設の流出や、同町を流れる小本川の氾濫による浄水施設の冠水被害状況を確認するとともに、その後の追加情報をもとに北海道地区での被害を整理した。

B. 研究方法

平成 29 年 8 月 2 日に岩手県下閉伊郡岩泉町への視察を行った。当日、午前中は岩泉町役場上下水道課でのヒアリングを行い、午後には二升石簡易水道松橋浄水場、及び門簡易水道斐綿浄水場取水施設・門浄水場の被害状況を視察した。北海道に関しては札幌市水道局の調査報告等[1]を参照としつつ、GIS 上に断水地域のみならずその水源流域についても表現し、降水と断水の関係を可視化した。GIS 解析には ArcGIS Desktop (ESRI ジャパン) を用いた。また、空知郡南富良野町幾寅での過去 40 年間の日最大降水量を用いて、確率降水プロット[2]を行った。

C. 研究結果及び D. 考察

岩泉町のヒアリングにより、同町の復旧に関する状況が明らかとなった。仮復旧は平成 28 年 10 月から 11 月、測量調査は平成 28 年 10 月から 12 月、災害査定は平成 29 年 1 月にそれぞれ行われた。また、工事は平成 29 年 3 月から実施された。

図 2 は二升石簡易水道松橋浄水場の様子である。図中、仮設の取水設備とあるが、本来、上流部にあった取水設備の損壊により、このような取水設備による取水が行われていた。当該浄水場の付近にあった建物も土石流による大きな被害を受けていた。図 3 は門簡易水道袋綿浄水場取水施設の様子である。砂防ダムを利用した取水施設が流出してしまい、その残骸を残していた。図 4 は門浄水場の様子である。小学校に隣接する同浄水場は、小本川の氾濫によりポンプ設備、制御盤が浸水した。現地を視察することにより、急激な流量変化をもたらす異常気象の水道への影響の大きさが再確認された。そもそも、気候変動の影響は小さな流域で顕在化しやすく、山間部では過去に例をみない急激な増水による、想定外の土砂災害の発生も懸念される。今回の視察先はその典型的な一例といえ、こういった水位変動の激しい山間部の設備に依存する水道では、今後の気候変動に伴う豪雨リスクの増加を十分に把握し、それに適応した設備の構築が求められる。一方で、小規模水道での職員不足も深刻化している。今回の岩泉町においても、盛岡市水道局からの復旧支援としてスタッフが長期派遣されていた。今後の人口減少を見据えたうえで連携体制の構築が重要であることは自明であるが、その根拠となる十分な気候変動リスク予測が求められることを再認識した。

図 5 は北海道における断水地域と、その地域に給水している水源流域に対して、降水量を棒グラフにて示したものである。台風を中心自体は北海道を通過しなかったものの、日高山脈沿いに大量の雨を降らせ、もっとも多いところでは、3 日間積算で 500 mm 以上を確認した。図より、断水地域の流域の降水量が高い様子が見える。また、空知郡南富良野町幾寅の確率降水を図 6 に示す。今回の台風 10 号によってもたらされた、平成 28 年 8 月 30 日に記録した降水量は、過去 40 年間で最大のものであった。さらには、上位 5 件のうち 4 件が 2000 年以降に生じている。このように、過去に例を見ない降水が今後の

気候変動により増加する懸念があり、水道設備における気候変動対策の重要性をうかがわせた。

E. 結論

平成 28 年台風 10 号によって甚大な被害をうけた岩手県岩泉町の水道施設被害を視察し、同地の水道設備が依存する、山間部の小さな河川の急激な水位変化に伴う被害の大きさを確認した。また、北海道地域での被害と降水の関係を、水源流域を含めた形で可視化するとともに、今回被害をもたらした降水が過去 40 年間に例を見ない豪雨であったことがわかった。

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

下ヶ橋雅樹，三浦尚之，平島邦人，佐野大輔，西村修，秋葉道宏（2018）．平成 28 年台風 10 号による東北・北海道での水道被害と降水特性．第 52 回日本水環境学会年会；2018 年 3 月 15～17 日，札幌．同講演集，p.474.

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] 猪子敬之介他（2017）水道協会雑誌 86(12), pp.15-23.

[2] 水谷武司（2012）「自然災害の予測と対策」、朝倉書店、東京．Pp. 135～138.

J. 謝辞

岩泉町視察においては、岩泉市上下水道課の皆様にご提供ならびに被害現場のご案内をいただきました。また、本研究の一部は、国立保健医療科学平成 29 年度院水道工学研修の一部と

して実施しました。北海道地区の被害状況整理においては、当研修の研修生であった札幌市水道局平島邦人氏に情報収集および整理を行っていただきました。記して謝意を表します。



図 1 岩泉町における損壊水道施設の視察（小本川流域）



図 2 二升石簡易水道－松橋浄水場



図3 門簡易水道一袋綿浄水場取水施設



図4 門簡易水道一門浄水場

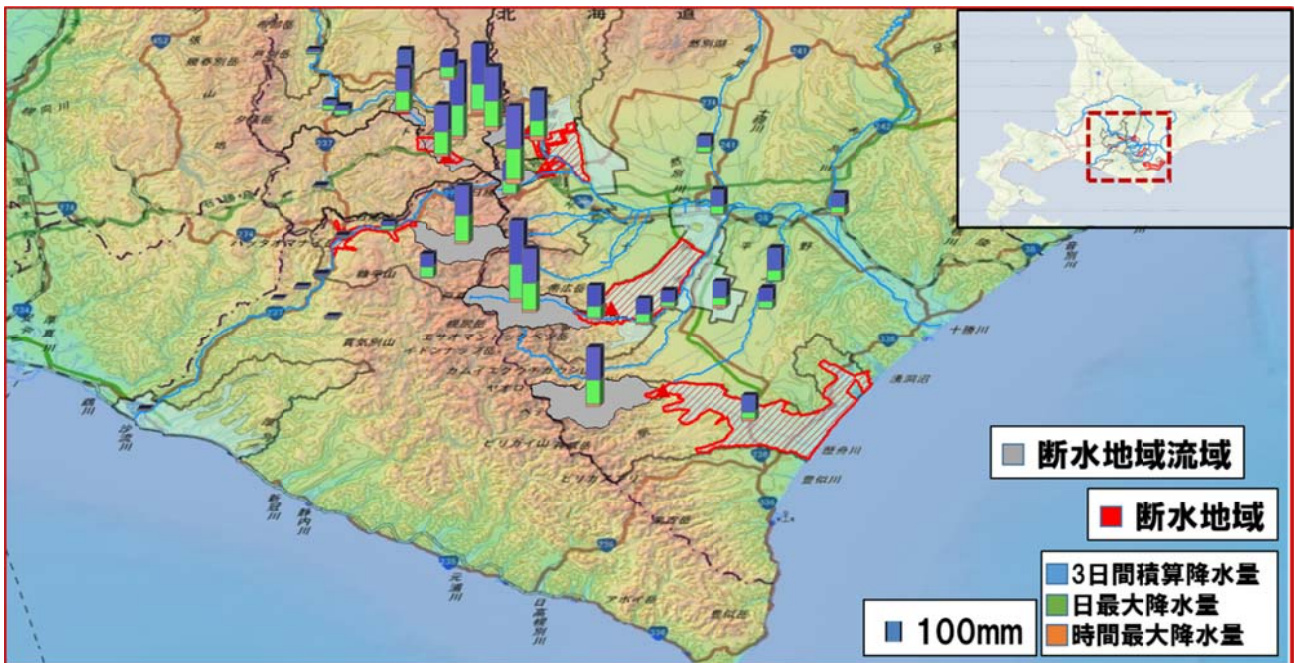


図5 北海道における断水地域とその流域，及び降水特性
 (背景の地図は，国土地理院 地理院地図 (電子国土 Web)より)

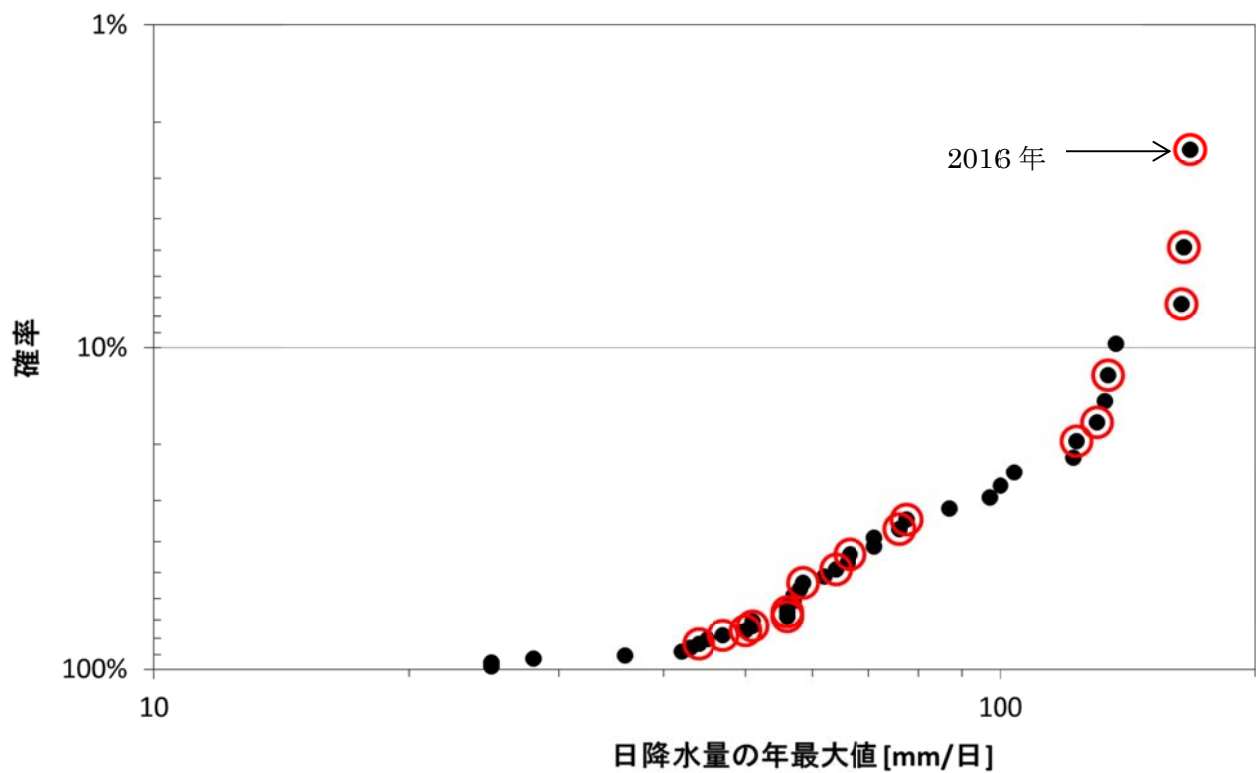


図6 空知郡南富良野町幾寅における確率雨量解析結果 (赤丸は 2000 年以降)

次世代シーケンサーによるろ過漏出障害
原因微生物の給配水系での挙動

研究代表者	秋葉	道宏
研究分担者	藤本	尚志
研究協力者	藤瀬	大輝

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）
「大規模災害および気候変動に伴う利水障害に対応した環境調和型
水道システムの構築に関する研究」
分担研究報告書

研究課題：次世代シーケンサーによるろ過漏出障害原因微生物の給配水系での挙動

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 藤本 尚志 東京農業大学応用生物科学部醸造科学科 教授
研究協力者 藤瀬 大輝 川崎市上下水道局水管理センター水道水質課 担当係長

研究要旨

これまで、浄水処理施設の生物障害であるろ過漏出障害原因微生物について水源から浄水処理工程水にかけての挙動について調査し多くの知見が得られた。しかし、浄水場から送水された給配水系統での挙動については、海外での事例についての文献はいくつか見られるが、国内での事例報告は乏しい。そこで、次世代シーケンサーを用いたろ過漏出障害原因微生物の同定技術を給水栓水に適用し、ろ過漏出原因微生物の給配水系での挙動を1年間にわたり調査し、以下の知見が得られた。

門レベルの解析では、時期により比率が異なるが、Proteobacteria が高い割合を示した。また、Cyanobacteria(植物プランクトンの葉緑体を含む)が一定割合検出されている。

門レベルの解析で優占した Proteobacteria 門について綱レベルの解析を行ったところ、Alphaproteobacteria 綱(Rhizobiales 目)が優占した。

給水栓水から検出された細菌の水道システム内の遷移を解析したところ、特徴的に沈澱池で割合が増える細菌、ろ過池で割合が増える細菌などを見つけることができた。水道施設内でそれぞれの細菌が局在し場所によって増減していることが示唆された。

A. 研究目的

浄水施設における生物障害を類別すると、凝集沈殿障害、ろ過閉塞障害、漏出障害、異臭味障害、その他の生物障害が挙げられる。その中で、凝集沈殿障害および漏出障害の原因の一つにピコプランクトンが関与していると考えられていた。

先の研究で、浄水場処理工程水の次世代シーケンサーの解析結果から総リード数に占めるピコプランクトンの割合は10%程度で、80-100%を従属栄養細菌が占めており、従属栄養細菌の濁度へ影響が大きいことが示唆された。また、これまで一般細菌や従属栄養細菌と一括りに評価してきた細菌類について、その細菌相は、水道システムの中で時期や浄水処理工程で大きく変遷しており、種や株によって浄水処理工程での除去性に違いがあることがわかった。¹⁾

しかしながら、浄水場から送水された給配

水系統でのこれらの挙動についての知見はほとんどなく、海外での事例についての文献はいくつか見られるが、国内での事例報告は乏しい。これらの調査には次世代シーケンサーが有効なツールであると考えており、給配水系で発生するバイオフィームや再増殖を引き起こす微生物について、水源から給水栓までの水道システム全体から、発生メカニズムを捉えることができると思われる。

本研究は、次世代シーケンサーを用いたろ過漏出原因微生物の同定技術を給水栓水に適用し、ろ過漏出原因微生物の給配水系での挙動を1年間にわたり実態調査を行い、給配水系統の細菌相を評価し、国内での事例報告とすることを目的とした。

B. 研究方法

1) 採水地点および試料の採取

採水地点は近傍の水質検査定点で、従属栄

養細菌が検出されている、浄水場から遠く、比較的夏場の残留塩素が低い、水質自動測定装置が設置されている、という条件に合った川崎市上下水道局京町ポンプ所水質自動測定装置脇給水栓を選定した。

試料の採取は、給水栓を開放し5分間放流後、100 L 採水した。採取期間は2015年7月から2016年7月までである。

比較試料として、給水栓水採水と同日の浄水場工程水（原水、沈殿処理水、ろ過水）を採水し試料に供した。

2) 次世代シーケンサーによる群集構造解析

試料は、孔径 0.2 μm のポリカーボネート製メンブレンフィルターによりろ過、集菌し、CTAB 法を用いてゲノム DNA の抽出を行った。抽出試料は、真正細菌の 16S rRNA 遺伝子 V4 領域（超可変領域）を増幅させるプライマー 515F, 806R を用いて Tailed PCR を行い、増幅産物を精製後、Illumina 社の MiSeq によるアンプリコンシーケンシングを行い、QIIME を用いた解析を行った。

C. 研究結果および D. 考察

図 1 に遺伝子の増幅に成功した給水栓水の2015年7月から2016年7月までの総リード数に占める各門レベルの割合を示した。時期により比率が異なるが、Proteobacteria 門が 77-99%と高い存在割合を示した。また、Cyanobacteria 門（植物プランクトンの葉緑体を含む）が 0.1-5.7%検出されており、濾過漏出をしたピコプランクトンを含む植物プランクトンが給水栓水に存在していることが示唆された。

門レベルの解析で優占していた Proteobacteria 門について、綱レベルの解析を行ったところ、Alphaproteobacteria 綱（Rhizobiales 目）が 50-100%を占め、優占していた。

給水栓水で検出された細菌について原水、沈殿処理水、ろ過水給水栓水でそれぞれ総リード数に対する割合の年間平均値を表に示した。総じて原水での存在割合の大きい細菌は、処理工程が進むにしたがって、割合が低下している一方、沈澱池で割合が上昇する細

菌、ろ過池で割合が上昇する細菌、給水栓水で割合が上昇する細菌も検出され、それぞれの施設で、特有の細菌が局在している可能性が示唆された。

E. 結論

本研究より、給水栓水の細菌叢を網羅的に解析（メタゲノム解析）することに成功した。

調査した試料は、Proteobacteria門 Alphaproteobacteria綱（Rhizobiales目）が優占しCyanobacteria門（真核藻類葉緑体を含む）が10%程度存在した。

ろ過水より給水栓水で高い比率占める細菌が存在し再増殖、バイオフィームの可能性を示唆された他、特有の細菌が浄水施設毎に局在している可能性が示唆された。

ろ過漏出障害原因微生物の給配水系における挙動について知見が得られると共に、微生物の再増殖の可能性を示唆する結果も得られた。

本手法を用いることで、水道システム全体の細菌の動態を網羅的にとらえることができ、水道における微生物学的研究の様々な場面に活用できると考えている。

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

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) 藤本尚志, 大西章博, 鈴木昌治, 藤瀬大輝, 岸田直裕, 秋葉道宏. クローニング法お

よび次世代シーケンサーによるろ過漏出
 障害原因生物の評価. 平成 28 年度全国会議
 (水道研究発表会) 講演集 p. 618 (2014)

表 給水栓水から検出された細菌の水道システム内の推移

界	門	綱	目	科	原水	沈殿	ろ過	給水	傾向	
Bacteria	Actinobacteria	Actinobacteria	Actinomycetales	ACK-M1	29.9%	18.3%	3.7%	2.6%		
	Bacteroidetes	Cytophagia	Cytophagales	Cytophagaceae	3.7%	10.1%	23.1%	0.5%		
		Flavobacteriia	Flavobacteriales	Cryomorphaeae	3.4%	1.3%	0.9%	0.3%		
				Flavobacteriaceae	0	1.2%	1.1%	0.3%		
	[Saprosirae]	[Saprosirales]	Chitinophagaceae	6.3%	6.2%	2.3%	0.7%			
	Cyanobacteria	4C0d-2	MLE1-12		0.0%	0.0%	0.2%	0.8%		
		Chloroplast	Cryptophyta		0.4%	1.0%	0.5%	1.1%		
			Stramenopiles		0.1%	9.0%	1.1%	1.2%		
		Nostocophycideae	Nostocales	Nostocaceae	0.0%	0.0%	0.0%	0.4%		
		Synechococophycideae	Synechococales	Synechococcaceae	0.0%	0.5%	0.3%	0.9%		
	Proteobacteria	Alphaproteobacteria	Rhizobiales	Other	0.0%	0.0%	0.4%	0.1%		
					0.2%	0.2%	1.8%	55.8%		
				Hyphomicrobiaceae	0.0%	0.0%	0.0%	0.3%		
				Methylobacteriaceae	0.0%	0.4%	0.7%	0.8%		
		Betaproteobacteria	Burkholderiales	Comamonadaceae	24.9%	25.9%	10.6%	2.7%		
				Methylophilales	Methylophilaceae	2.2%	0.4%	0.2%	0.2%	
				Rhodocyclales	Rhodocyclaceae	0.7%	1.8%	0.3%	0.2%	
		Gammaproteobacteria	Pseudomonadales	Moraxellaceae	0.3%	2.0%	15.7%	14.1%		
	Pseudomonadaceae			0.0%	0.1%	0.9%	0.3%			

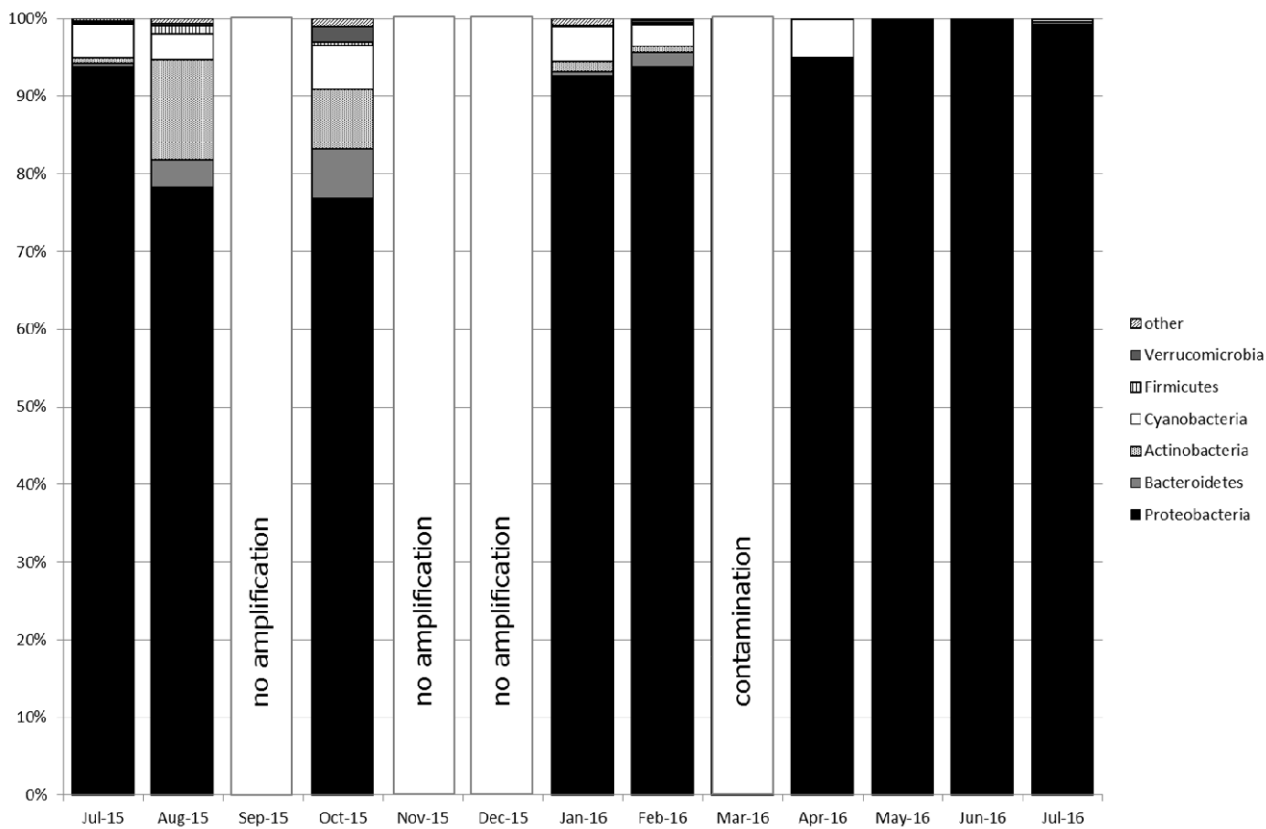


図1 給水栓水における細菌相の推移

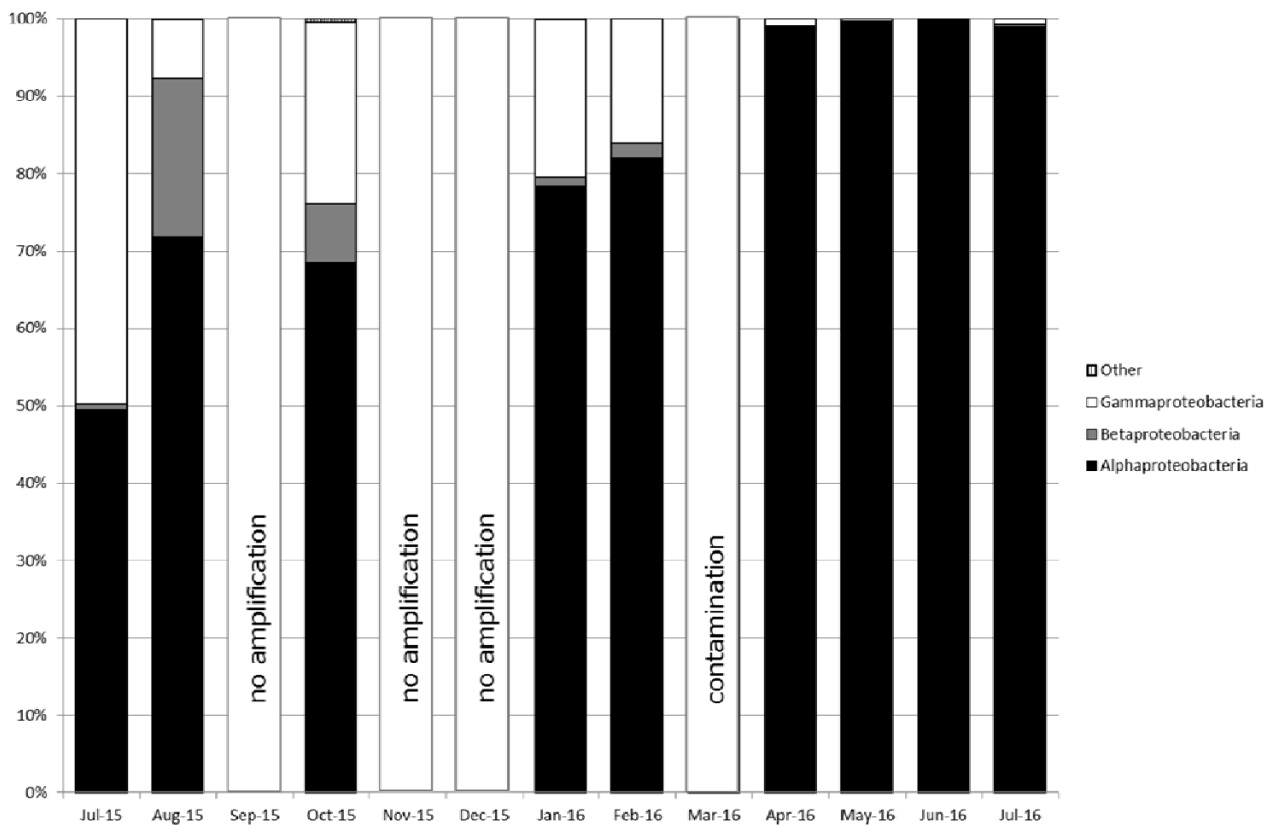


図2 給水栓水におけるProteobacteria門の細菌相の推移

大規模災害における感染症リスク とその管理

研究代表者	秋葉 道宏
研究協力者	三浦 尚之
研究分担者	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）
「大規模災害および気候変動に伴う利水障害に対応した環境調和型
水道システムの構築に関する研究」
分担研究報告書

研究課題：大規模災害における感染症リスクとその管理

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 三浦尚之 国立保健医療科学院生活環境研究部 主任研究官
研究分担者 下ヶ橋雅樹 国立保健医療科学院生活環境研究部 首席主任研究官

研究要旨

台風やハリケーン等による洪水、及び津波等の大規模な自然災害時には、公衆衛生の基盤となる上下水道システムの機能が停止し、病原微生物によって汚染された飲用水や生活用水を利用することにより感染症が発生するリスクがある。本分担研究では、世界で過去 15 年間に発生した大規模災害に着目し、被災地における水系感染症及び蚊媒介感染症の発生状況や飲用水の水質に関する情報を整理し、その管理に関する国際的な動向を調査した。2004 年 12 月のスマトラ島沖地震による津波後には、被災地において下痢症、コレラ、赤痢、チフス等の散発的な発生が見られたが、大規模な流行には至らなかった。スリランカでは、政府が水系感染症の流行対策として早期から塩素消毒された飲用水と衛生的な居住環境の供給を徹底したため、飲用水は微生物学的に概ね良好な水質だった。2005 年 8 月に米国ルイジアナ州を襲ったハリケーン・カトリーナ後には、テキサス州ヒューストンの避難所において 1,169 人の感染性胃腸炎の集団発生があり、患者便試料からはノロウイルスが検出された。2011 年 3 月の東北地方太平洋沖地震後の福島県郡山市の避難所においても、ノロウイルスによる 212 人の感染性胃腸炎の集団発生が見られた。大規模災害発生後に水系感染による胃腸炎の流行は確認されなかったが、避難所において汚物や汚染物が適切に処理されなかったり、トイレが衛生的でなかったために、集団発生が起こった可能性が指摘された。途上国においては、洪水や津波の発生後に創傷感染による破傷風やレプトスピラ症の流行があり、傷口を洗浄し衛生的に保つためには、衛生的な環境に加えて安全な水の供給が不可欠であると考えられた。また、国際的な動向として、SDGs のターゲットや気候変動を考慮した WSPs 策定ガイダンスにおいて、災害時の感染症対策について言及されていた。

A. 研究目的

台風やハリケーン等に伴う集中豪雨による洪水や土石流、及び地震や津波等の大規模災害時には、上下水道システムが機能を失い、安全な水の供給や衛生的な環境の維持が困難な状況が生じる。その結果、不衛生な水を直接または間接的に摂取することによる下痢症等の水系感染症や水溜まりで蚊が大量に発生することによるマラリアやデング熱等の蚊媒介性感染症のリスクが高まる。また、避難所においては、避難者が密集することにより衛生的な生活が制限され、下痢症や呼吸器感染症の集団発生が起こることが問題と

して指摘されている。

洪水は、世界で最も頻繁に見られ、近年気候変動との関連も指摘されている自然災害であり¹⁾、我が国においても平成 26 年 8 月豪雨、平成 27 年 9 月関東・東北豪雨、平成 28 年台風 10 号、及び平成 29 年 7 月九州北部豪雨により毎年のように発生している。グローバル化がますます進み、また IT の発達に伴い交通と物流がさらに高速化した現代社会においては、人と物と共に病原体も海外とを往来するため、国際的に感染が拡大しやすい状況にある。2014 年 8 月に代々木公園で蚊に刺されたことによりデング熱患者が発生し、最終的

に都内で108人の患者が報告されるに至ったことは記憶に新しいところである²⁾。また、2015～2016年には、デングウイルスと同様にヤブカ属の蚊によって媒介されるジカウイルスによる感染症が中南米諸国を中心に流行し³⁾、日本への輸入症例も確認された⁴⁾。また、病原体は、感染していても症状のない不顕性感染者によっても国内に移入するリスクがあることが知られている。

国内では流行していない感染症の病原体が移入するリスクがある中、近年頻発している極端な気象状況による災害時には、安全な水や衛生的な環境へのアクセスが制限されるために下痢症をはじめとする水系感染症や蚊媒介感染症のリスクが高まることが懸念される。しかしながら、近年国内外において発生した大規模災害後に被災地における水系感染症や蚊媒介感染症の流行状況をまとめた報告は非常に限られている¹⁾。以上のような背景のもと、本分担研究では、世界で過去15年間に発生した大規模災害に着目し、被災地における水系感染症及び蚊媒介感染症の発生状況や飲用水の水質に関する情報を整理することとした。さらに、大規模災害時の感染リスク管理に関する国際的な動向を調査した。

B. 結果

1. スマトラ島沖地震による津波後の感染症発生状況

2004年12月26日、インドネシア西部スマトラ島北西沖のインド洋でマグニチュード9.1の地震が発生したことにより、平均で高さ10mの津波がインド洋沿岸に押し寄せ、スリランカ、インド、インドネシア、タイ、マレーシア、ミャンマー、モルディブ、東アフリカ諸国を含めた14カ国において、およそ23万人の死者・行方不明者が発生した⁵⁾。

菅又ら(2007)は、津波の被害が最も甚大だったスマトラ島のアチェ州において2005年1月に、はしか、破傷風、コレラの患者が発生したこと、及び2月には風邪や発熱等の内科疾患が増加したことを報告した⁶⁾。Muriukiら(2012)はマラリアの罹患率を調査し、アチェ州の罹患率がインドネシア全体の平均よりも高かったことを明らかにした⁷⁾。津波後には、広範囲に塩分を含んだ水溜まりでき蚊が繁殖しやすくなること、および蚊が

大発生している真ただ中に多くのマラリア感染者が避難のために移動し、非感染者の側に近づくことにより、マラリアが流行するリスクが高まることが指摘されている⁸⁾。

青柳ら(2006)は、スマトラ島沖地震発生からおおよそ2ヶ月半後にスリランカ南部の津波被災地において、飲用の給水タンク水と井戸水の微生物汚染およびトイレの設置・管理状況等の衛生状況を調査した⁹⁾。給水タンク、簡易浄水器、及びボトルの水試料(N=6)は、2試料で一般細菌陽性であったが、大腸菌群は検出されず、ほとんどが飲用に適していた。一方で、調査した全ての井戸水試料(N=4)からは、糞便汚染の指標となる大腸菌群または大腸菌が検出された。津波被災地においては、衛生環境の悪化からコレラ、赤痢、チフス等の重篤な感染症の流行が懸念されたため、スリランカ政府はその対策として早期から塩素消毒された飲用水と衛生的な居住環境の供給を徹底した。その結果、下痢症を始めとする感染症の流行は抑制されたと報告した⁹⁾。

2. ハリケーン・カトリーナ後の避難所における感染性胃腸炎の流行

ハリケーン・カトリーナは、2005年8月25日にフロリダ半島に上陸し、その後8月29日にルイジアナ州に再上陸した。その際、テキサス州ヒューストンに24万人が避難したと推計されている。8月31日には、24,000人がReliant公園の避難所に避難していた。米国疾病予防管理センター(CDC)の報告によると、Reliant公園の内科診療所において、9月2日に下痢と嘔吐を伴う感染性胃腸炎患者の増加が認められ、9月12日までの期間に受診した6,500人のうち、1,169人(18%)が感染性胃腸炎症状を訴えた¹⁰⁾。44人の患者便のうち、22検体(50%)からノロウイルスが検出された。

ルイジアナ州では、9月8日から25日までの期間に、皮膚感染症が640例、急性呼吸器感染症が505例、下痢症が146例発生した¹¹⁾。また、テキサス州ダラスでは、メチシリン耐性黄色ブドウ球菌(MRSA)による皮膚感染がおおよそ30例報告された¹²⁾。また、*Vibrio vulnificus*及び*V. parahaemolyticus*による創傷感染が24例発生し、そのうち6例が死亡した。

3. 台風 Ketsana によるマニラ首都圏におけるレプトスピラ症の流行

台風 Ketsana は、2009 年 9 月 26 日にフィリピンのルソン島を横断し、集中豪雨をもたらした。マニラ首都圏では 8 割近くが冠水し、約 2 ヶ月半後も水が引くことなく冠水が続いたため¹³⁾、被災者は汚染された環境水が居住環境の側に存在する状態で長期間生活することを余儀なくされた¹⁴⁾。マニラ首都圏においては、病原性レプトスピラに汚染された水や土壌を介して伝播する人獣共通細菌感染症のレプトスピラ症が流行し、2009 年 10 月 1 日から 11 月 19 日の期間に 2,299 名が発症し、178 名が死亡した^{13,14)}。沼澤ら (2011) は、2009 年 10 月、11 月、及び 12 月に洪水試料及び河川水試料を採取し (N=37)、リアルタイム PCR 法を用いて 34 試料から病原性レプトスピラ遺伝子を検出した¹⁴⁾。クローニング・シーケンシングの結果、陽性試料の中には 3 種の病原性レプトスピラ (*L. wolffii*, *L. licerasiae*, *L. kmetyi*) が含まれていたことを報告した。

4. 東北地方太平洋沖地震による東日本大震災後の避難所における嘔吐・下痢症の流行

2011 年 3 月 11 日に三陸沖の太平洋でマグニチュード 9.0 の地震が発生し、岩手県、宮城県、福島県では高さが 4~9 m 以上の津波が押し寄せ、沿岸部や平野部で甚大な被害を出した。警視庁によると、2011 年 3 月現在で、15,895 人の死者、2,539 人の行方不明者が発生した¹⁵⁾。

関谷ら (2011) によると、2011 年 4 月 7 日以降に福島県郡山市の避難所において、嘔吐、下痢の症状を呈した患者が増加し、3 名の便検体からノロウイルス GII.4 が検出された¹⁶⁾。2011 年 3 月 25 日以降に嘔吐または 1 回以上の下痢の症状があり救護所を受診し、かつ整腸薬等を処方された者は、計 212 例あったと報告した。集団発生後には、感染拡大防止を目的とした手指の衛生と環境の清掃・消毒が徹底され、4 月 20 日には終息した。

郡山市の避難所においては、インフルエンザの散発的な発生が 7 例報告されたが、早期対応により感染拡大には至らなかった¹⁷⁾。その後、福島県の県南地域においては、5 月に約 30 名の急性呼吸器感染症集団発生事例、7~8 月には計 23 名の急

性呼吸器感染症が報告された¹⁸⁾。茨城県においては、インフルエンザ様疾患及び急性下痢症の散発的な発生が見られたが、集団発生には至らなかった¹⁹⁾。

5. タイ洪水による感染症の発生

タイでは、2011 年 6 月から 9 月まで雨季と台風により平年の 1.2~1.8 倍の大雨を記録した²⁰⁾。その結果、7 月末から 3 ヶ月以上に渡ってタイ北部や中部地方のチャオプラヤー川流域において大洪水が発生し、1,360 万人の生活に影響が生じ、851 人が犠牲になった。UN はデング熱等の蚊媒介性感染症の予防に殺虫剤処理した蚊帳を 2 万個配布し²¹⁾、UNICEF は感染性疾患の流行対策として 3 万個の衛生用品を配布した²²⁾。

山川ら (2012) は、2011 年 11 月下旬にタイ中央部のノンタブリー県及びパトゥンタニー県において実施された医療支援活動に訪れた患者に多く見られた健康問題を調査し、筋・関節痛、慢性疾患、及び急性呼吸器感染症 (上気道・下気道を含む) が高い割合だったことを報告した²³⁾。その中で、学校に避難していた患者における急性呼吸器感染症の有病割合が他の避難所 (寺や集団用テント) よりも高く、その要因の一つとして、学校が他の避難所と比較して人が密集し閉鎖的な空間だった可能性を指摘した。WHO・タイ保健省・米国 CDC 共同センターによっても、被災者に急性呼吸器感染症、結膜炎、下痢症等が見られたことが報告されたが²³⁾、それらの感染症の流行に関する報告はなかった。

6. スマトラ島沖地震以前の大規模災害における感染症流行状況

國井は、大規模な地震による津波発生後の感染症流行状況を調査し、1964 年 3 月のアラスカ地震、1964 年 4 月のアリューシャン地震 (米国)、1993 年 7 月の北海道南西沖地震 (奥尻島地震)、及び 1998 年 7 月パプア・ニューギニア地震の津波発生後に、被災地において下痢症、マラリア等の感染症が流行した事実はないと報告した²⁴⁾。また、菅又ら (2007) は、1995 年 1 月の兵庫県南部地震による阪神・淡路大震災においても、感染症の流行はなかったと報告した⁶⁾。避難所において、インフルエンザウイルスの感染が確認された場合に

のみ避難者にワクチンの接種を行う等、地震発生の翌日から感染症の原因微生物を特定して治療や予防対策が実施されたことが奏功したと考察した⁶⁾。さらに、1999年8月のイズミット地震(トルコ)、2003年9月の平成15年十勝沖地震、2004年10月の新潟県中越地震においても、感染症の流行はなかったと報告した⁶⁾。

7. 災害時感染症対策の世界的動向

国連の「持続可能な開発のための2030アジェンダ」における「持続可能な開発目標」(SDGs)は、今後の国際社会の動向を決定する世界的な取り組みの一つである。災害時の感染症対策の視点からは、そのターゲット11.5に示された、水に関連する災害による死者や被災者数の大幅な削減が例として挙げられる。その他、極端な気象状況等への脆弱性の低減を示したターゲット1.5や、気候関連災害や自然災害に対する強靱性及び適応性の強化を謳ったターゲット13.1もその例と言える。これらのターゲットはいずれもその指標として、10万人当たりの災害による死者数、行方不明者数、直接的負傷者数を挙げている。

一方、WHOの推進する水安全計画(WSPs)は、水道システムにおける危害評価と危害管理を行い、安全な水の供給を確実にするためのリスクマネジメント手法であり、ここ10年間でその導入が急速に進んでいる²⁵⁾。特に気候変動に対しては、2017年にWHOより、WSPsにおける気候変動の水質・水量に与えるリスクの特定・管理を目的としたガイダンスが出された²⁶⁾。このガイダンスでは、豪雨と感染症の因果経路として、衛生的な水の不足、洪水による水衛生設備の損壊、適切に機能していない下水道からのオーバーフロー等が挙げられている。また、災害に対する脆弱性は地域ごとに評価すべきであることや、その際に歴史的な記録を参照することに加え、将来の気候変動データを用いたモデルシミュレーション²⁷⁾の必要性も示されている。そもそも本ガイダンスは、WHO/IWAの水安全計画マニュアル²⁸⁾に記載されているWSPモジュールと整合しており、WSPプロセスに気候変動を組み込む具体的手順が、各モジュールごとに示されている。例えば、ハザードの特定とリスクアセスメントにおいては、クリプトスポリジウム等の病原体が、降水強度の増加に

伴って表層土壌粒子とともに高い濃度で水源に混入すること、さらにそれが長期間の乾燥や山火事で助長されることが、例示されている。他方、普段使用している、すなわち長年にわたって水源とはタイプの異なる代替水源を使用する場合の専門知識の欠如も問題として挙げられていた。これは気候変動に伴う水不足が生じた場合の留意事項として示されているが、災害時の留意事項としても重要であろう。

C. 結論

本研究では、世界で過去15年間に発生した大規模災害として、スマトラ島沖地震(2004年12月)、ハリケーン・カトリーナ(2005年8月)、台風Ketsana(2009年9月)、東北地方太平洋沖地震(2011年3月)、及びタイ洪水(2011年6月)における水系感染症及び蚊媒介性感染症の流行状況を調査した。その結果、スマトラ島沖地震による津波後にはアチェ州においてマラリアの流行が、ハリケーン・カトリーナ及び東北地方太平洋沖地震後には避難所においてノロウイルスによる感染性胃腸炎の流行が確認された。途上国の被災地においては、下痢症、コレラ、赤痢、チフス等の発生が見られたが、大規模な流行には至らなかった。一方で、津波や洪水の発生後に創傷感染による破傷風やレプトスピラ症の流行があり、傷口を洗浄し衛生的に保つためには、衛生的な環境に加えて安全な水の供給が不可欠であると考えられた。また、国際的な動向として、SDGsのターゲットや気候変動を考慮したWSPs策定ガイダンスにおいて、災害時における感染症対策に関する言及が見られた。

近年、梅雨前線に伴う集中豪雨の頻発や真夏日の記録更新等、極端な気象状況が顕在化している。例えば東京の2017年7月の最高気温(31.8℃)および最低気温(24.0℃)は、同時期の東南アジア諸国の都市とほとんど差がない状況である。また、2017年の訪日外客数は、5年前の3.4倍に増え、28,691,073人である²⁹⁾。今後も上述したような極端現象が起きやすくなることが指摘されているだけでなく、2020年東京オリンピック・パラリンピック競技大会に向けて訪日外客数がさらに増加すると考えられることから、大規模災害に対して強靱な上下水道システムを整備することが重

要である。

D. 健康危険情報

該当なし

E. 研究発表

1) 論文発表

該当なし

2) 学会発表

該当なし

F. 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

G. 参考文献

1) Kouadio, I.K., Aljunid S, Kamigaki T, Hammad K, Oshitani H. Infectious diseases following natural disasters: prevention and control measures. *Expert Rev Anti Infect Ther.* Vol.10(1), p.95–104, 2012.

2) 関なおみ. 代々木公園を中心とした都内のデング熱国内感染事例発生について. *IASR* Vol.36, p.37–38, 2015.

3) 西條政幸, 藤谷好弘, 島田智恵. ジカウイルス感染症の疫学. *IASR* Vol.37, p.121–122, 2016.

4) 国立感染症研究所 感染症疫学センター. ジカウイルス感染症とは (<https://www.niid.go.jp/niid/ja/kansennohanashi/6224-zika-fever-info.html>)

5) U.S. Geological Survey. Magnitude 9.1 - Off the west coast of northern Sumatra (<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2004/us2004slav/>)

6) 菅又昌実, 山折潤子, 矢野一好, 瀬子義幸, 長谷川達也. 大規模自然災害時における衛生水準の低下と二次災害としての感染症発生について – 特に飲料水の安全性確保維持の重

要性について – . 都市科学研究 Vol.1, p.63–70, 2007.

7) Muriuki, D., Hahn, S., Hexom, B., Allan, R. Cross-sectional survey of malaria prevalence in tsunami-affected districts of Aceh Province, Indonesia. *Int J Emerg Med.* Vol.5(1), 11, 2012.

8) Witt, D. Post-Tsunami Malaria in Indonesia – The Pivotal Contributions of Permanente Physicians. *Perm J.* Vol.9(4), p.69–71, 2005.

9) 青柳潔, 吉田雅文, 錦織伸幸, 阿部朋子, 國井修. スマトラ沖地震津波後のスリランカ南部における飲用水および衛生状況. *長崎医学会雑誌* Vol.81(1), p.1–4, 2006.

10) CDC (Centers for Disease Control and Prevention). Norovirus outbreak among evacuees from hurricane Katrina – Houston, Texas, September 2005. *MMWR* Vo.54(40), p.1016–1018, 2005.

11) CDC (Centers for Disease Control and Prevention). Surveillance for illness and injury after hurricane Katrina – New Orleans, Louisiana, September 8–25, 2005 *MMWR* Vo.54(40), p.1018–1021, 2005.

12) CDC (Centers for Disease Control and Prevention). Infectious Disease and Dermatologic Conditions in Evacuees and Rescue Workers After Hurricane Katrina – Multiple States, August–September, 2005. *MMWR* Vo.54(Dispatch), p.1–4, 2005.

13) Republic of the Philippines, National Disaster Coordinating Council. Situation report No. 52 on Tropical “Ondoy” (Ketsana) glide no. TC-2009–000205-PHL and Typhoon “Pepeng” (Parma) glide no. TC-2009–000214-PHL (http://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/D87F541373D245BC4925767A000C5761-Full_Report.pdf), 2009.

14) 沼澤聡, 真砂佳史, 齋藤麻理子, 山口諒, 押谷仁, 大村達夫. マニラ首都圏における台風 Ketsana による洪水域内環境水からの病原性レプトスピラの検出. *土木学会論文集 G (環境)* Vol.67(7), III_165–III_171, 2011.

15) 警察庁緊急災害警備本部. 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震の被害状況と警察

- 措置 (<https://www.npa.go.jp/news/other/earthquake2011/pdf/higaijokyo.pdf>), 2018.
- 16) 関谷紀貴, 砂川富正, 安井良則, 谷口清州, 阿部孝一. 福島県郡山市の避難所における嘔吐・下痢症集団発生事例. IASR Vol.32, p.S8–S9, 2011.
 - 17) 阿部孝一. 避難所感染症サーベイランスシステムを用いた感染症発生状況の把握と対策—郡山市. IASR Vol.32, p.S8, 2011.
 - 18) 遠藤幸男. 福島県南地域における避難所サーベイランス. IASR Vol.32, p.S7, 2011.
 - 19) 入江ふじこ, 小沼弘美, 砂川富正, 神谷元, 八幡裕一郎. 茨城県における避難所感染症サーベイランス. IASR Vol.32, p.S10, 2011.
 - 20) 国土交通省水管理・国土保全局, 独立行政法人土木研究所水災害リスクマネジメント国際センター. タイにおける洪水の状況について (<http://www.mlit.go.jp/common/000170329.pdf>), 2011.
 - 21) UN. As flood disaster worsens in Thailand, UN steps up relief efforts. UN News (<https://news.un.org/en/story/2011/10/393362-flood-disaster-worsens-thailand-un-steps-relief-efforts>), October 28, 2011.
 - 22) UN. UNICEF ramps up efforts to help flood victims in Thailand. UN News (<https://news.un.org/en/story/2011/11/394592-unicef-ramps-efforts-help-flood-victims-thailand>), November 10, 2011.
 - 23) 山川路代, Khruengkarnchana, P., 頼藤貴志, 大政朋子, 土居弘幸. タイの大洪水の被災者の健康への影響—医療支援活動に基づく記述. 国際保健医療, Vol.27(2), p.183–188, 2012.
 - 24) 國井修. 総説: 災害地における感染症対策—スマトラ沖地震・津波に対する対策と課題 (<https://www.koshu-eisei.net/saigai/kunii/kunii3.pdf>)
 - 25) WHO and IWA (International Water Association), “Global status report on water safety plans: A review of proactive risk assessment and risk management practices to ensure the safety of drinking-water.” WHO/IWA, 2017.
 - 26) WHO. Climate-resilient water safety plans: Managing health risk associated with climate variability and change. World Health Organization, 2017.
 - 27) 秋葉道宏, 下ヶ橋雅樹, 靱山将. 相模ダム流域の水文モデル作成と気候変動影響評価. In: 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)大規模災害および気候変動に伴う利水障害に対応した環境調和型水道システムの構築に関する研究(研究代表者: 秋葉道宏), 平成28年度 総括・分担研究報告書, 2017.
 - 28) WHO and IWA (International Water Association). Water safety plan manual. Geneva: World Health Organization, 2009.
 - 29) 日本政府観光局. 国籍/月別 訪日外客数(2003年～2018年, https://www.jnto.go.jp/jpn/statistics/since2003_tourists.pdf), 201

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
藤本尚志, 山崎雄佑, 遠藤沙紀, 渡邊英梨香, 蔣紅与, 大西章博, 藤瀬大輝, 三浦尚之, 秋葉道宏	16S rRNA遺伝子の解析による浄水場処理工程水のピコシアノバクテリア生物相の評価	用水と廃水	59(9)	667-674	2017
今本博臣, 安藤昌文, 壺岐宏, 小野島 広	御嶽山噴火に伴う牧尾ダム貯水池の水質対応	ダム工学	27(2)	133-140	2017

学会発表

発表者氏名	発表タイトル名	学会名	日時	場所	ページ
下ヶ橋雅樹, 秋葉道宏	水道システムの気候変動への適応	第30回環境工学連合講演会	2017年5月	東京	同講演集, 51-54
Yuta Shinfuku, Hirokazu Takanashi, Tsunenori Nakajima, Akira Ohki, Masaki Sagehashi and Michihiro Akiba	Exploring a fishy-smelling compound in raw waters with high resolution mass spectrometry and multivariate analysis	26th Symposium on Environmental Chemistry	2017年6月	Shizuoka	同講演集, 120
Yuta Shinfuku, Hirokazu TAKANASHI, Tsunenori Nakajima, Akira Ohki, Masaki Sagehashi and Michihiro Akiba	Exploring a Fishy-Smelling Substance in Raw Waters for Water Supply with High Resolution Mass Spectrometry and Multivariate Analysis	Water and Environment Technology Conference 2017	2017年7月	Sapporo	同講演集, 51
新福優太, 高梨啓和, 中島常憲, 大木章, 下ヶ橋雅樹, 秋葉道宏	高分解能質量分析計と多変量解析による水道水生ぐさ臭原因物質の探索	環境科学会2017年会	2017年9月	東京	同講演集, 2
新福優太, 高梨啓和, 中島常憲, 大木章, 下ヶ橋雅樹, 秋葉道宏	DNPH誘導体化における測定妨害物質の除去を目的とした固相抽出の適用	第20回日本水環境学会シンポジウム	2017年9月	和歌山	同講演集, 123
山内康正, 下ヶ橋雅樹, 秋葉道宏	水道水源流域の水収支の数理モデル化と気候変動影響評価ー埼玉県営水道の地球温暖化適応策の検討ー	平成29年度全国会議(水道研究発表会)	2017年10月	高松市	同講演集, 844-845
靱山将, 下ヶ橋雅樹, 秋葉道宏	水文モデルを用いた相模ダム流域の気候変動影響評価	平成29年度全国会議(水道研究発表会)	2017年10月	高松市	同講演集, 212-213

下ヶ橋雅樹, 島昌伸, 嶽仁志, 小坂浩司, 島崎大, 秋葉道宏	アンケート調査による平成28年熊本地震の応援給水活動の実態把握と課題の抽出	平成29年度全国会議(水道研究発表会)	2017年10月	高松市	同講演集, 884-885
清水和哉, 穂山紗耶, 月野慎也, Hanchen Miao, 内海真生, 秋葉道宏	栄養塩が及ぼす藍藻類のカビ臭物質産出への影響	第54回日本水処理生物学会年会	2017年11月	吹田市	日本水処理生物学会誌別巻, (37), 19
館祥之, 多田早奈恵, 坂巻隆史, 野村宗弘, 西村修	ピコ植物プランクトンの凝集処理におけるフロック径分布	第54回日本水処理生物学会年会	2017年11月	吹田市	日本水処理生物学会誌別巻, (37), 62
新福優太, 高梨啓和, 中島常憲, 大木章, 下ヶ橋雅樹, 秋葉道宏	DNPH誘導体化アルデヒドをLC/MSで測定する際の妨害物質の除去	第52回日本水環境学会年会	2018年3月	札幌市	同講演集, 120
館祥之, 多田早奈恵, 野村宗弘, 坂巻隆史, 西村修	ピコ植物プランクトン凝集処理において上澄み水に残留する粒子の特性	土木学会東北支部技術研究発表会	2018年3月	郡山市	同要旨CD-ROM, VII-63
下ヶ橋雅樹, 三浦尚之, 平島邦人, 佐野大輔, 西村修, 秋葉道宏	平成28年台風10号による東北・北海道での水道被害と降水特性	第52回日本水環境学会年会	2018年3月	札幌市	同講演集, 474
下ヶ橋雅樹, 藤井隆夫, 高梨啓和, 秋葉道宏	水道におけるカビ臭物質の吸着に与える活性炭構造の影響	化学工学会第83年会	2018年3月	吹田市	同講演オンライン要旨O220