

厚生労働科学研究費補助金（健康安全・危機管理対策総合研究事業）
総括研究報告書

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 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供給システムの提案を目的とし、流域の水管理対策、気候変動に伴う生物障害対策、及び水供給システムの環境調和と持続可能性の評価に関する研究を実施した。

横浜市水道局他が水道水源とする相模ダム流域の河川流出モデルとして、複雑さの異なる3つのモデル(回帰式, タンクモデル, 準分布型水文モデル (Soil and Water Assessment Tool; SWAT)) を作成し、洪水、渇水の流出量の予測性を比較したところ、洪水、渇水双方を再現するには SWAT が適していることがわかった。この相模ダム流域を十分に再現する SWAT パラメータセットを用いて、代表的濃度経路 (RCP) 2.6, 4.5, 8.5 での Model for Interdisciplinary Research on Climate の version 5 (MIROC5)による将来 (2081~2100 年) 気候計算結果を入力としたシミュレーションを行い、過去の気象条件下での流出と比較したところ、2, 4月の渇水の増加, 6, 7月の洪水の増加が示唆された。

臭気物質の一般的な構造に鑑み、生ぐさ臭臭気原因物質をアミン類, アルコール類, チオール類およびカルボニル化合物と仮定し、このうちのカルボニル化合物について検討した。その結果、水道原水の TON および原因生物である *Uroglena americana* の中群体換算数と相関関係が認められ、別水系から採取した *Uroglena americana* の培養液からも検出された物質が発見され、その分子式を $C_{13}H_{20}O_3$ と推定した。

長沢浄水場の原水、沈澱処理水、ろ過水について、次世代シーケンサーを用いて 16S rRNA 遺伝子アンプリコンを解析し、約3年間にわたり微生物相について評価を行った結果、本手法がろ過漏出障害原因微生物を詳細に評価する上で有用であることが明らかとなった。また、原水は Betaproteobacteria 綱および Actinobacteria 綱が主要となった。沈澱処理水は主に Betaproteobacteria 綱の占める割合が高かった。ろ過水は多くの月で Gammaproteobacteria 綱が主要となった。

カオリン懸濁液およびピコ植物プランクトン懸濁液を用いた凝集実験を行ったところ、濁度やゼータ電位、粒径変化の結果から、通常ポリ塩化アルミニウム (PAC) の多量注入はゼータ電位のマイナス値を大きくし、凝集フロックの再分散を引き起こすため濁度上昇が発生する原因である可能性が示唆された。一方、高塩基度 PAC の使用は、多量注入した際でも高い濁度除去効果があり、特徴の一つである残留アルミニウム濃度の低減効果も確認できた。濁度除去効果の高い高塩基度 PAC であるが、生物除去に関しては濁度除去と同等の効果が得られない可能性が示唆された。

カビ臭物質合成酵素遺伝子群が、放線菌および藍藻類のそれぞれにおいて保存されていることを明らかにした。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、正の相関関係があることが室内実験からも確認されたことから、分子生物学的手法を用いてカビ臭物質産生微生物の個体群数を定量することは、カビ臭発生予測手法の構築に活用できることがわかった。一方、TN/TP カビ臭物質産生への影響の知見から、TN/TP が高い際に 2-MIB 産生量が高くなることがわかった。また、クロロフィル合成が活発ではない定常期から死滅期に、1細胞あたりのジェオスミン産生量および 2-MIB 産生量が高くなった。

平成 28 年熊本地震の応援給水活動について、実際に活動を行った水道事業者の方々へのアンケートにより、資機材の有用性や活動上の課題等が抽出された。地震発生直後には照明器具、仮設給水栓セット、携帯型残留塩素計の有用性が高かった。また半数以上が交通や滞在における問題を感じていた。地震発生から 1 週間経過後には残留塩素計のニーズが高かった。高齢者に関する問題としては、水の運搬や、高齢者への配慮における問題が生じていた。また、全般の問題としては、資機材不足の他、情報伝達が不十分であったことや、指揮系統が不安定であったことが問題として抽出された。

平成 28 年台風 10 号により発生した断水について、文献調査に基づき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た。さらに、GIS を用いて 8 月 29～31 日の 3 日間降水量、最大断水戸数・断水期間、台風進路、水道給水区域の情報を統合して断水被害の分布を解析した結果、降水量と最大断水戸数の相関性が可視化された。また、簡易水道の給水区域では、断水期間が長くなる傾向が見られた。

水道生物分野での藻類の学名の取り扱いについて提案を行なうことを目的として、文献調査に基づき藍藻類の分類について整理した。主に光学顕微鏡を使用する水道生物分野では、透過型電子顕微鏡や遺伝子解析による情報を必要とする Komárek の体系に基づく正確な分類・同定は現実的には困難である。したがって、光学顕微鏡を用いた迅速な分類・同定及び計数を基本とする水道生物分野では、今後も光学顕微鏡による分類体系に基づいた従来の種名を踏襲することが妥当と考えられた。

平成 26 年の御嶽山噴火が牧尾ダムの水質に与えた影響として、噴火直後の流入濁度は、出水時だけでなく平水時においても千度以上となり、その傾向は約 2 ヶ月間継続した。一方、放流濁度は、試験放流を実施した 12 月、水位低下期の 3 月、及び出水を貯留する 4 月を除くと、例年とほぼ同様の値まで低下していた。噴火後 2 年が経過した現在においても、出水後の pH は、流入水では pH4.5、貯水池内では pH4.0、放流水では pH3.5 まで低下する場合がある。健康項目について、カドミウム、鉛、六価クロム、砒素、総水銀、セレン、ホウ素、フッ素については、流入地点で濁度が極端に高い場合は、環境基準値を上回ることがあるが、そのような場合でも溶解成分で比較すると、ほぼ環境基準値以下になっていた。一方、貯水池地点と放流地点では、貯水池内でほとんどの火山噴出物（濁質）が沈降するというダムによる副次的効果の影響で、環境基準値以下になっていた。

秋季循環形成後の芹川ダムでは、微生物による 2-MIB 分解が発現し、濃度低減に寄与することが示唆された。またこの生物分解は、化学合成された市販 2-MIB よりも、自然界に存在する生物産生型 2-MIB に対して、速度が大きいことが示唆された。2-MIB 濃度低減能が認められた検液と認められなかった検液とを対象とした、次世代シーケンサーによる微生物群集構造解析に基づく比較により、2-MIB 濃度低減能が認められた各種検液では Actinobacteria 門 Ilumatobacter 属の構成割合が共通して大きいという結果が得られたことから、本属が 2-MIB 分解に寄与する可能性が示唆された。

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ところ、門レベルの解析で浄水場ろ過水と給水栓水の細菌相構成比は似ていたが、綱レベルの解析から、給水栓水でアルファプロテオバクテリア綱の存在比率が高くなる傾向が見られた。さらに詳細な解析から、ろ過水より給水栓水で高い比率を示す細菌の存在を確認した。この結果は、給配水システムで再増殖やバイオフィルムを形成する細菌の可能性を示唆している。

研究分担者

| | |
|-------|---------------------------------|
| 西村 修 | 東北大学東北大学大学院 工学研究科 教授 |
| 藤本尚志 | 東京農業大学応用生物科学部 醸造科学科 教授 |
| 高梨啓和 | 鹿児島大学大学院 理工学研究科 准教授 |
| 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 |
| 清水和哉 | 筑波大学 生命環境系准教授 |

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、流域システムの水管理対策に関する研究や気候変動に伴う生物障害対策に関する研究等を実施した。

B. 研究方法

1) 相模ダム流域の水文モデル作成と気候変動影響評価

まず、モデル選択の妥当性を評価するため、日ごとの流出水量を計算しうる、回帰式、タンクモデル、準分布型水文モデル (Soil and Water Assessment Tool (SWAT)) を相模ダム流域に対して作成し、豪雨と渇水に対する予測性を比較した。回帰式は最も単純なモデルであり、降水と河川流量の関係を示す。タンクモデルは次に複雑なものであり、ここでは蒸発散を考慮した3段タンクモデルを作成した。SWAT は昨年度も報告しているとおりであるが、流域初期化やパラメータ補正・検証の期間の変更や、感度

解析に基づくパラメータの再補正を行った。気象データは農業環境技術研究所の1kmメッシュデータを用いた。各モデルの妥当性評価にあたっては、相模ダム流入量の観測値（神奈川県）とモデルにより計算される流出水量から算出されるNSE及びPBIASを指標とした。

これらのモデルのうちで、SWATについては、新たに提案した、補正対象パラメータを選択したのちにPBIASに感度の高いパラメータをまず補正し、引き続いて残りのパラメータを補正する方法により、洪水のみならず低流量も含めた長期間の再現性の良好なパラメータセットを得た。さらに得られたパラメータセットを用いて、将来気候の影響予測を行った。ここでは、過去（1981～2000年）の流量実測値と、将来（2081～2100年）の予測値の比較をもって、将来の気候変動の影響として評価した。過去の気象データについては、農業環境技術研究所ならびに気象庁から得た。将来気候については、Model for Interdisciplinary Research on Climateのversion 5 (MIROC5)により、2100年の放射強制力が2.6、4.5及び8.5 W/m²となる代表的濃度経路 (RCP) (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5) での計算結果を使用した。なお、MIROC5の計算結果は過去の気象データを用いたバイアス補正によりSWATの計算に使用しうるレベルまで解像度を向上させた。なお、将来予測においては土地利用の変化は想定しなかった。

2) 高分解能質量分析計を用いた臭気原因物質の探索

京都市上下水道局蹴上浄水場取水池で採水した検体を水道原水試料水として用いた。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培養し、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。

水道原水試料水中に存在する溶存酸素を亜硫酸ナトリウムにより除去した後、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、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を用いて加圧ろ過を行った。

ろ過された試料水は、疎水性相互作用により試料水中の原因物質を固相吸着カートリッジに吸着させた後に脱離した。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。

その後 2,4-dinitrophenylhydrazine を用いた誘導体化処理を行い、得られた原因物質を高分解能 LC/MS にて測定した。得られたデータは、LC/MS データ統合解析ソフトを用いて、カラム保持時間の揺らぎを補正した後、サンプルの測定に先だって測定されたブランクサンプルの測定結果との差異解析が行われた。その後、OPLS 回帰分析を行い、VIP 値が 1 未満の独立変数（検出された物質に相当）を試料水の TON やウログレナ中群体換算値と相関関係が認められない物質として除害した。次に相関分析を行い、Pearson の相関係数が 0.4 以下であった物質を排除した。最後に、重回帰分析を行った。

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

川崎市上下水道局長沢浄水場の着水井から採水した原水、凝集沈澱処理後の沈澱処理水、および急速砂ろ過池の出口より採水したろ過水を試料として用いた。2014 年の原水および沈澱処理水は孔径 3 μm 、2014 年のろ過水と、2015 年、2016 年の全処理工程水は孔径 5 μm のメンブレンフィルターを用いてろ過し、ナノプランクトンを除去した。ろ液を孔径 0.2 μm のポリカーボネート製メンブレンフィルターを用いてろ過し集

菌した。集菌したフィルターを裁断し、50ml チューブに回収した。回収したフィルターから CTAB 法に従って、ゲノム DNA を抽出した。乾燥して TE buffer に溶解させた後、アガロースゲル電気泳動によりゲノム DNA を確認した。

16S rRNA 遺伝子の V4 超可変領域を増幅するように設計されたプライマー 515F と 806R を用いて PCR を行った。各試料につき 3 つのリアクションで増幅を行い、PCR 終了後、1.5ml チューブに混合したものをライブラリーとした。精製した PCR 産物の配列を次世代シーケンサーを用いて決定し、QIIME を用いて塩基配列を解析し、97% 以上の相同性を基準に OTU 分けを行った。

4) 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

カオリンを用いた懸濁液で凝集実験を行った。ジャーテストの攪拌条件は、急速攪拌 (100 rpm) 1 分経過後に凝集剤を注入し、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、原水濁度を 20 程度になるよう調整した。凝集剤には、通常 PAC および高塩基度 PAC を用い、凝集剤注入量を 0, 10, 20, 40, 60, 80 (mg/L) とした。凝集沈殿後の上澄水における pH、アルカリ度、濁度、ゼータ電位、残留アルミニウム濃度をそれぞれ測定し凝集効果の比較を行った。

ピコ植物プランクトン懸濁液を用いた凝集実験では、(独) 国立環境研究所 NIES-1348 の *Synechococcus* sp. を対象とした。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 程度になるよう希釈し、これを原水として使用した。ジャーテスト攪拌条件および凝集剤添加量はカオリン懸濁液同様の条件とし、それぞれの pH、アルカリ度、濁度、ゼータ電位、アルミニウム濃度、粒

径分布、ピコプランクトン数を測定した。

また、ろ過処理実験において、上記と同様の実験条件で凝集沈殿処理を行った上澄水を砂ろ過によって処理し、その処理水の濁度、粒径、ピコ植物プランクトン数を測定した。ろ過後の処理水に砂が混ざらないよう、濁度が0になるまで蒸留水を流し続けた砂ろ過筒を用いてろ過処理実験を行った。

5) カビ臭発生予測手法の構築

カビ臭物質産生微生物群の定量とカビ臭物質産生活性の定量手法の開発のために、平成27年度に上水源や水域から単離した放線菌様細菌(106株)を用いて、単離菌の遺伝子解析を実施した。全DNAを用いて16S rRNA遺伝子をPCRクローニングし、アガロースゲル電気泳動法によりPCR産物を精製した後、塩基配列解読に供した。得られた塩基配列を用いてblastn解析を行い、16S rRNA遺伝子配列に基づいた単離菌の同定およびgeoA遺伝子ホモログの塩基配列を同定した。また、ジェオスミン合成酵素遺伝子(geoA遺伝子ホモログ)を保存している細菌をblastn検索により調査した。geoA遺伝子ホモログおよび2-MIB合成に関与する重要な遺伝子であるメチルトランスフェラーゼ遺伝子およびシクラーゼ遺伝子を国際塩基配列データベースから取得し、単離菌から得た塩基配列の相同性解析を行った。

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、およびCT培地の窒素分量を2倍量に変化させた改変CT培地(TN/TP=13.1)を用いて、TN/TPが細胞増殖およびカビ臭物質産生量へ与える影響を解析した。細胞増殖量を示すクロロフィルa(Chl.a)と死細胞量を示すフォエ色素をホットメタノール法を用いて抽出し、分

析した。カビ臭物質は、固相抽出-GC/MS法により分析した。植菌後4日経過する毎にサンプル(n=5)を採取し、分析を行った。

6) 平成28年熊本地震の応急給水支援活動に関するアンケート調査

平成28年9月、同地震の応援派遣を実施した水道事業者のうち91事業体に、電子メールによりアンケート調査を依頼した。アンケート票は応急給水に関する調査票と緊急時の水質検査に関する調査票からなるが、今回の報告は前者についてのものである。応援派遣時の期間、活動全般において問題と感じた点、資機材の有用性等からなるものであり、また応急給水に派遣されたときの状況について、水道事業者の応援給水に関する包括的の意見ではなく、個別の事例に対する職員個人の考えについての回答を依頼した。アンケート票の発送は平成28年9月16日～29日に行った。

7) GISを用いた平成28年台風10号による断水被害分布解析

内閣府が発表した「平成28年台風10号による被害状況等について(平成28年8月30日10時00分現在から平成28年11月16日14時00分現在の全24報)」をウェブページからダウンロードし、市町村別の最大断水戸数、断水期間、及び断水原因に関する情報を整理した。また、気象庁が提供している8月29～31日の3日間降水量及び台風進路、国土交通省が提供している国土数値情報・上水道関連施設データの給水区域を収集した。被害が甚大、断水の発生戸数・期間が最大だった岩手県下閉伊郡岩泉町については、岩泉町が発表した「台風災害に関する最新情報(平成28年9月2日午後5時現在から平成29年1月31日に現在の全55報)」をウェブページからダウンロードし、町内に複数存在する簡易水道について、断水の発生と復旧過程を調査した。

収集したデータセットをArcGIS 9.3(ESRIジャパン)を用いて統合し、8月29

～31日の3日間降水量と最大断水戸数の関係、水道施設の種類（規模）と断水期間の関係を解析した。

8) 水道生物分野における藻類の分類・命名法に関する検討

平成29年1月23日に検討委員会を開催し、水道生物分野における藻類の分類・命名法について方向性を議論した。また、文献調査に基づき藍藻類の分類について整理し、水道生物分野での学名の取り扱いについての提案をとりまとめた。

9) 御嶽山噴火に伴う牧尾ダム貯水池の水質対応

牧尾ダムでは、これまで年間に12回の頻度で水質調査を実施していたが、御嶽山噴火以降に大量の噴出物が流入・堆積している状況が確認されたため、噴火の翌日より調査地点、調査頻度、調査項目を引き上げることとした。

噴火の影響が最も懸念される濁度とpHについては、流入地点（表層）、ダムサイトから上流200mの貯水池地点（表層）、放流地点（表層）の3地点を選定し、調査頻度を2014年9月28日～10月31日が2回/日、11月1日～12月19日が1回/日、12月20日以降は1回/週で実施した。

また、精度の高い水質予測を実施するため、貯水池内の濁度とpHの鉛直分布を、ダムサイトから上流200m、1,500m、3,000mの3地点（水深1～5mピッチで湖底まで連続測定）で、1回/週～1回/2週の頻度で実施した。更に、2014年10月から11月にかけて、流入地点（表層）とダムサイトから上流200mの貯水池地点（湖底+1m）で濁質の粒度分布を4回測定した。

噴火に伴う火山噴出物が人の健康に与える影響を把握するための項目は、カドミウム、鉛、六価クロム、ヒ素、総水銀、セレン、ホウ素、フッ素の8項目とし、流入地点（表層）、ダムサイトから上流200mの貯水池地点（表層）、放流地点（表層）で1回/月の頻度で測定した。

10) 秋季循環形成後の芹川ダムにおける2-メチルイソボルネオール（2-MIB）の低減についての評価

秋季循環前後の芹川ダム湖水による2-MIB濃度推移評価においては、試料採取は平成27年11月5日及び同年11月25日に行い、芹川ダム堰堤付近の水深0.5m及び湖底直上1m(B+1m:約13m)にて採取した、計4種のダム湖水を試料とした。各試料につき「① 無処理水」「② 孔径5 μ mのポリカーボネートフィルター(TNTP04700,Merck Millipore社)にて吸引ろ過後のろ液」「③ ①の高圧蒸気滅菌水」「④ ②の高圧蒸気滅菌水」の各調製をし、各液にて市販2-MIB標準液を希釈し、それぞれ200ng/Lとした。以上計16種の検液を約2週間20 $^{\circ}$ C恒温保存し、継時的に2-MIB濃度を測定した。

市販2-MIB及び生物産生型2-MIBの濃度推移評価においては、生物産生型2-MIBは、大分市でCT培地にて培養中の*Pseudanabaena galeata*培養株試験管を15分超音波処理したのち、予め50%エタノールにて通液洗浄しておいた孔径0.20 μ mのシリンジフィルターにて培養液を5mLろ過することにより調製した。平成27年11月25日に採取した水深0.5mの試料にて、市販2-MIB及び生物産生型2-MIBを希釈し、それぞれ200ng/Lとした。また超純水にて生物産生型2-MIBを希釈し200ng/Lとした後に2つに分け、一方には生物の不活化を目的として次亜塩素酸ナトリウムを添加し残留塩素濃度1mg/Lに調製し、これらの2種を対照系とした。以上計4種の検液を20日間20 $^{\circ}$ C恒温保存し、継時的に2-MIB濃度を測定した。

11) 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

採水地点は同一配水系統の定点で、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月から毎月採水した。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）を採水した。

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

1) 相模ダム流域の水文モデル作成と気候変動影響評価

3種のモデル比較の結果、相模ダム流域において豪雨に伴う洪水とともに少雨に伴う渇水（低流量）も予測するためには、SWATを利用することが妥当であることがわかった。また、今回用いた、PBIASに高感度なパラメータをまず補正する方法は、NSEのみを参照する補正と比較して、より再現性の高いハイドログラフを与えた。

このパラメータセットを用いたSWATにて、RCP2.6、4.5、8.5でのMIROC5による将来（2081～2100年）気候計算結果を入力としたシミュレーションを行ったところ、このパラメータセットを用いたSWATにて、RCP2.6、4.5、8.5でのMIROC5による将来（2081～2100年）気候計算結果を入力としたシミュレーションを行ったところ、RCP2.6および4.5では過去（1981～2000年）の気象からは推算されないレベルの、流域からのピーク流出が推算された。またRCP4.5では過去の気象からは推算されない長期的な低流量が推算された。特に2、4月の渇水リスク増加、6、7月の洪水リスク増加が示唆された。

2) 高分解能質量分析計を用いた臭気原因物質の探索

サンプルから検出されたイオンを重回帰分析が可能な数まで絞り込み、多変量解析を用いて、得られた分析結果を解析したところ、由来の異なる試料水から共通して検出され、試料水のTONおよびUroglena americanaの中群体換算数と高い相関関係を示す物質を発見した。同物質は、DNPH（2,4-dinitrophenylhydrazine）で誘導体化されていると考えられるため、カルボニル化合物と考えられた。また、その誘導体化される前の分子式を推定したところC₁₃H₂₀O₃が得られた。

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

約3年間の結果に基づいて評価したところ、原水ではBetaproteobacteria綱、Actinobacteria綱の占める割合が高いことが明らかとなった。沈殿処理水ではBetaproteobacteria綱の割合が高く、Actinobacteria綱、Gammaproteobacteria綱、Cytophagia綱の割合が高まる時期もあった。ろ過水の生物相は原水、沈殿処理水とは大きく異なり、3年間を通してGammaproteobacteria綱の占める割合が高く、夏から秋にかけてAlphaproteobacteria綱、冬から春にかけてCytophagia綱の割合が高まる傾向がみられた。ろ過水から検出される主要な微生物はCytophagia綱Pseudarcicella属、Gammaproteobacteria綱Crenothrix属、Enhydrobacter属、Acinetobacter属、Actinobacteria綱Ca. Planktophila limnetica、Alphaproteobacteria綱Methylobacterium属、Sphingomonas属、Azorhizobium属、Cyanobacteria綱Synechococcus属等であった。

以上の結果から、ろ過漏出障害原因微生物の評価法として次世代シーケンサーを用いた16S rRNA遺伝子アンプリコン解析の有用性が示された。沈殿処理水とろ過水の微生物相が大きく異なる傾向が確認され、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。

4) 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

通常 PAC において多量注入時に濁度上昇が発生した。一方で、高塩基度 PAC において 60, 80 mg/L の多量注入時に濁度がほぼ 0 になり、安定した濁度除去効果が得られることがわかった。しかし、凝集能をピコ植物プランクトンの残存数で評価した場合、PAC と高塩基性 PAC の間に差は無く、凝集・沈殿によって除去されない植物ピコプランクトンが存在することがわかった。そこで上澄水に残存する粒子の粒径を調べた結果、40 mg/L 注入時には両 PAC ともに 100 μm 付近にピークが現れたが、80 mg/L では両 PAC ともに 10 μm 前後に粒径のピークが現れ、凝集フロックの再分散が示唆された。また、上澄水の簡易的な砂ろ過処理により、ろ過後の濁度は 0.0 度となった。ただし、ピコ植物プランクトンの細胞数は両 PAC とも 2000 cells/mL 前後検出され、粒径約 4 μm にピークが現れた。このような凝集・沈殿および砂ろ過によっても除去されないフロックの生成メカニズムについて、さらなる検討が必要である。

5) カビ臭発生予測手法の構築

geoA 遺伝子ホモログは、放線菌 Streptomyces 属と他の属では相同性が低く、藍藻類では同じ属内では相同性が高いものの他の属間では相同性が低かった。この結果から、藍藻類では geoA 遺伝子ホモログを用いて属を区別できることがわかった。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、それぞれ異なる属間でも高い相同性を示した。一方、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となることが推測された。TN/TP がカビ臭物質産生へ与える影響解析の結果、TN/TP が高い方が 2-MIB 産生量が高くなることがわかった。また、クロロフィルの生合成が活発ではない定常期から死滅期に、カビ臭物質の生合成経路へ切り替わることが推測された。1 細胞あたりのカビ臭合成

活性は低いと推測されるものの、細胞量が多い際に高いカビ臭物質濃度が検出されたため、カビ臭物質産生微生物の個体群数を定量することで、カビ臭の発生を推測できることがわかった。

6) 平成 28 年熊本地震の応急給水支援活動に関するアンケート調査

アンケート回収率は 64% (58 事業体, 216 名) であった。解析にあたっては、応援活動開始日が本震後 3 日以内、4 日~7 日、8 日以上 の 3 つに区分した。持参資機材において、非常に役に立った/持参すればよかったものとしては、本震後 3 日以内では、給水車・トラック・広報車以外の車両、照明器具、仮設給水栓セット、携帯型残留塩素計、8 日以上では、携帯型残留塩素計の回答割合が高かった。また応急給水支援上の問題点については、本震後 3 日以内では、「非常にあった」「あった」が交通、滞在、余震の順であり、半数以上が交通や滞在における問題を感じていた。高齢者に関する問題としては、水の運搬や、高齢者への配慮における問題が生じていた。また、全般の問題としては、資機材不足の他、情報伝達が不十分であったことや、指揮系統が不安定であったことが問題として抽出された。

7) GIS を用いた平成 28 年台風 10 号による断水被害分布解析

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 GIS を用いて統合し、断水被害の分布を解析した結果、降水量と最大断水戸数の相関性が可視化された。また、取水施設や管路が土砂災害により損壊した簡易水道の給水区域では、断水期間が長くなる傾向が見られた。

8) 水道生物分野における藻類の分類・命名法に関する検討

光学顕微鏡を用いた迅速な分類・同定及び計数を基本とする水道生物分野では、透過型電子顕微鏡や遺伝子解析による情報が必要とする Komárek の体系に基づく正確な分類・同定は現実的には困難である。したがって、今後も光学顕微鏡による分類体系

に基づいた従来の種名を踏襲することが妥当と考えられた。

9) 御嶽山噴火に伴う牧尾ダム貯水池の水質対応

噴火直後の流入濁度は、出水時だけでなく平水時においても千度以上となっていた。このような傾向は約2ヶ月間継続した。一方、放流濁度は、試験放流を実施した12月、水位低下期の3月、及び出水を貯留する4月を除くと、例年とほぼ同様の値まで低下していたことから、水質保全対策の効果があったものと考えられる。pHについては、噴火後2年が経過した現在においても、出水後のpHは、流入水ではpH4.5、貯水池内ではpH4.0、放流水ではpH3.5まで低下する場合がある。健康項目について、噴火に伴う火山噴出物が人の健康に与える影響を把握するために選定したカドミウム、鉛、六価クロム、砒素、総水銀、セレン、ホウ素、フッ素については、流入地点で濁度が極端に高い場合は、環境基準値を上回ることがあるが、そのような場合でも溶解成分で比較すると、ほぼ環境基準値以下になっていた。一方、貯水池地点と放流地点では、貯水池内でほとんどの火山噴出物（濁質）が沈降するというダムによる副次的効果の影響で、環境基準値以下になっていた。

10) 秋季循環形成後の芹川ダムにおける2-メチルイソボルネオール（2-MIB）の低減についての評価

芹川ダムにおいて、秋季循環前のダム湖水では、2-MIB低減機構は発現していないと推察された。一方、秋季循環後のダム湖水では2-MIB濃度低減機構が湖内全層的に発現し、この機構には、高圧蒸気滅菌で失活する5 μ m以下の因子が関与することが明らかとなった。先行研究を参考にし、この2-MIB濃度低減には微生物による生物分解が関与し、芹川ダムの秋季循環によって微生物が底層部から巻き上げられ、湖内に拡散することにより、全層的に2-MIB分解能を有するようになることが推察された。また、2-MIB濃度低減能が認められたダム湖水にて、市販2-MIB及び生物産生型2-MIBを希釈した、2種の検液での2-MIB濃度推移評

価を行った。その結果、生物産生型2-MIBを用いた調製検液は市販2-MIBを用いた調製検液よりも大きい濃度低減速度が認められた。両者の2-MIB構造の違いが、生物分解の進行に影響していると推察された。さらに微生物群集構造解析により、2-MIB濃度低減能が認められた各種検液ではActinobacteria門Ilumatobacter属の構成割合が大きいという共通の結果が得られたことから、本属が2-MIB分解に寄与する可能性が示唆された。

11) ろ過漏出障害原因微生物の給配水系での挙動

門レベルの解析で浄水場ろ過水と給水栓水の細菌相構成比は似ていたが、綱レベルの解析から、給水栓水でアルファプロテオバクテリア綱の存在比率が高くなる傾向が見られた。さらに詳細な解析から、ろ過水より給水栓水で高い比率を示すプロテオバクテリア門細菌の存在を確認した。この結果により、給配水系統における再増殖やバイオフィーム形成の可能性が示唆された。

E. 結論

1) 相模ダム流域の水文モデル作成と気候変動影響評価

複雑さの異なる3モデル（回帰式、タンクモデル、SWAT）を作成し、豪雨と渇水の流出水量の予測性を比較した。豪雨に関しては、最も単純な回帰式では、回帰の範囲を考慮することによりある程度の予測ができることがわかった。またタンクモデル及びSWATでは良好な予測性が確認された。一方、渇水に関してはSWATの再現性の高さが際立った。

相模ダム流域の流出を再現するSWATのパラメータ補正方法の改定や降雪についてより詳細な検討等を行い、良好なパラメータセットを得、このパラメータセットを用いてRCP2.6, 4.5, 8.5でのMIROC5による将来（2081～2100年）気候計算結果を入力としたシミュレーションを行った。その結果特に2, 4月の渇水リスク増加、6, 7月の洪水リスク増加が示唆された。

2) 高分解能質量分析計を用いた臭気原因

物質の探索

水道水生ぐさ臭臭気原因物質の探索を実施した。臭気物質の一般的な構造に鑑み、生ぐさ臭臭気原因物質をアミン類、アルコール類、チオール類およびカルボニル化合物と仮定し、本年度はカルボニル化合物について検討した。その結果、水道原水の TON および原因生物である *Uroglena americana* の中群体換算数と相関関係が認められ、別水系から採取した *Uroglena americana* の培養液からも検出された物質が発見され、その分子式を $C_{13}H_{20}O_3$ と推定した。

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

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、本手法がろ過漏出障害原因微生物を詳細に評価する上で有用であることが明らかとなった。また、原水は *Betaproteobacteria* 綱および *Actinobacteria* 綱が主要となった。沈澱処理水は主に *Betaproteobacteria* 綱の占める割合が高かった。ろ過水は多くの月で *Gammaproteobacteria* 綱が主要となった。

4) 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

通常 PAC において多量注入時に濁度上昇が発生した。一方で、高塩基度 PAC において 60, 80 mg/L の多量注入時に濁度がほぼ 0 になり、安定した濁度除去効果が得られることがわかった。しかし、凝集能をピコ植物プランクトンの残存数で評価した場合、PAC と高塩基性 PAC の間に差は無く、凝集・沈殿によって除去されない植物ピコプランクトンが存在することがわかった。そこで上澄水に残存する粒子の粒径を調べた結果、40 mg/L 注入時には両 PAC とともに 100 μm 付近にピークが現れたが、80 mg/L では両 PAC とともに 10 μm 前後に粒径のピークが現れ、凝集フロックの再分散が示唆された。また、上澄水の簡易的な砂ろ過処理により、ろ過後の濁度は 0.0 度となった。ただし、ピコ植物プランクトンの細胞数は両 PAC とともに 2000 cells/mL 前後検出され、粒径

約 4 μm にピークが現れた。このような凝集・沈殿および砂ろ過によっても除去されないフロックの生成メカニズムについて、さらなる検討が必要である。

5) カビ臭発生予測手法の構築

カビ臭物質合成酵素遺伝子群が、放線菌および藍藻類のそれぞれに保存されていることを明らかにした。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ることを室内実験からも確認し、分子生物学的手法を用いてカビ臭物質産生微生物の個体群数を定量することは、カビ臭発生予測手法の構築に活用できることがわかった。一方、TN/TP カビ臭物質産生への影響の知見から、TN/TP が高い際に 2-MIB 産生量が高くなることがわかった。また、クロロフィル合成が活発ではない定常期から死滅期に、1 細胞あたりのジェオスミン産生量および 2-MIB 産生量が高くなった。

6) 平成 28 年熊本地震の応急給水支援活動に関するアンケート調査

平成 28 年熊本地震の応援給水活動のアンケートにより、資機材の有用性や活動上の課題等が抽出された。地震発生直後には照明器具、仮設給水栓セット、携帯型残留塩素計の有用性が高かった。また半数以上が交通や滞在における問題を感じていた。地震発生から 1 週間経過後には残留塩素計のニーズが高かった。高齢者に関する問題としては、水の運搬や、高齢者への配慮における問題が生じていた。また、全般の問題としては、資機材不足の他、情報伝達が不十分であったことや、指揮系統が不安定であったことが問題として抽出された。

7) GIS を用いた平成 28 年台風 10 号による断水被害分布解析

平成 28 年台風 10 号により発生した断水について、文献調査に基づき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た。さらに、GIS を用いて 8 月 29～31 日の 3 日間降水量、最大断水戸数・断水期間、台風進路、水道給水区域の情報を統合して断水被害の分布を解析した結果、降水量と最大断水戸数の相関性が可視化され

た。また、取水施設や管路が土砂災害により損壊した簡易水道の給水区域では、断水期間が長くなる傾向が見られた。

8) 水道生物分野における藻類の分類・命名法に関する検討

文献調査に基づき藍藻類の分類について整理した。

9) 御嶽山噴火に伴う牧尾ダム貯水池の水質対応

御嶽山噴火が牧尾ダムの水質に与えた影響を確認し、濁度の視点からは水質保全対策の効果があったものと考えられた。pHについては噴火後2年が経過した現在においても、出水後のpHは、流入水ではpH4.5、貯水池内ではpH4.0、放流水ではpH3.5まで低下する場合があった。また、カドミウム、鉛、六価クロム、砒素、総水銀、セレン、ホウ素、フッ素については、流入地点で濁度が極端に高い場合は、環境基準値を上回ることがあるが、そのような場合でも溶解成分で比較すると、ほぼ環境基準値以下になっていた。一方、貯水池地点と放流地点では、環境基準値以下になっていた。

10) 秋季循環形成後の芹川ダムにおける2-メチルイソボルネオール(LM)の低減についての評価

秋季循環形成後の芹川ダムでは、微生物による2-MIB分解が発現し、濃度低減に寄与することが示唆された。またこの生物分解は、化学合成された市販2-MIBよりも、自然界に存在する生物産生型2-MIBに対して、速度が大きいことが示唆された。次世代シーケンサーによる微生物群集構造解析に基づく比較により、2-MIB濃度低減能が認められた各種検液ではActinobacteria門Ilumatobacter属の構成割合が共通して大きいという結果が得られたことから、本属が2-MIB分解に寄与する可能性が示唆された。

11) 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

本研究より、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。

F. 健康危険情報

なし

G. 研究発表

1. 論文発表

- 1) 秋葉道宏, 下ヶ橋雅樹, 靱山将. 水供給システムにおける気候変動の影響—生物障害の発生に及ぼす水温上昇の影響について—, 用水と廃水 **59(1)**, 45-50, 2017.
- 2) 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. 培養法および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, 用水と廃水 **59(3)**, 197-203, 2017.
- 3) 野村宗弘, 安齋英悟, 秋葉道宏, 西村修. ピコ植物プランクトンのろ過処理に及ぼす凝集の効果, 日本水処理生物学会誌 **52(3)**, 65-71, 2016.
- 4) 北村壽朗. 相模川水系における障害生物-障害生物の遷移と本川における藻類の繁殖事例-, 用水と廃水 **58(7)**, 509-516, 2016.

2. 学会発表

- 1) 靱山将, 下ヶ橋雅樹, 秋葉道宏. 気候変動影響評価のための河川流出モデルの予測性比較. 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, 218-219, 2016.
- 2) 靱山将, 永見健輔, 桑原直樹, 下ヶ橋雅樹, 秋葉道宏. 水道水源流域の水文モデルの作成と気候変動の影響評価. 第51回日本水環境学会年会; 2017年3月, 熊本市. 同講演集, 414, 2017.
- 3) 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MSと多変量解析による水道原水生ぐさ臭原因物質の探索, 第51回日本水環境学会年会; 2017年3月, 熊本市. 同講演集, 627, 2017.
- 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, 758-759, 2016.
- 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, 204, 2017.
- 6) 多田早奈恵, 田中伸幸, 千葉信男, 西村修, 秋葉道宏. ピコ植物プランクトンの凝集処理プロセスの最適化, 日本水処理生物学会誌別巻 (36), 16, 2016.
- 7) 多田早奈恵, 田中伸幸, 千葉信男, 秋葉道宏, 西村修. ピコ植物プランクトンによる凝集阻害メカニズムと凝集処理プロセスの改善, 第 51 回日本水環境学会年会; 2017 年 3 月, 熊本市. 同講演集, 431, 2017.
- 8) 穂山紗耶, 月野慎也, 木村奈々, 中島敦, 岸田直裕, 内海真生, 秋葉道宏, 清水和哉. カビ臭物質産生における引き金因子の解明. 第 51 回日本水環境学会年会; 2017 年 3 月, 熊本市. 同講演集, 603, 2017.
- 9) 下ヶ橋雅樹, 島昌伸, 嶽仁志, 小坂浩司, 島崎大, 秋葉道宏. 平成 28 年熊本地震の応援給水活動に関するアンケート調査. 平第 51 回日本水環境学会年会; 2017 年 3 月, 熊本市. 同講演集, 111, 2017.
- 10) 小野島広大, 今本博臣. 御嶽山噴火に伴う対応及び水質に関する影響. 平成 28 年度国土交通省国土技術研究会, 2016 年 11 月, 東京都千代田区, 自由課題, 安全安心 1, 2016.
- 11) 高橋威一郎, 高瀬勝教, 廣川諒, 河野博幸, 馬見塚守, 岐津英明. 秋季循環形成後の芹川ダムにおける 2-メチルイソボルネオール (2-MIB) の低減についての評価. 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, 788-789, 2016.
- 12) 藤瀬大輝, 渡邊英梨香, 藤本尚志, 秋葉道宏. 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. 平成 28 年度全国会議 (水道研究発表会). 2016 年 11 月; 京都市. 760-761, 2016.
- H. 知的財産権の出願・登録状況 (予定を含む)
1. 特許取得
なし
 2. 実用新案登録
なし
 3. その他
なし