

課題名 S-8-1(3) 気候変動による水資源への影響評価と適応策に関する研究

課題代表者名 滝沢 智 (国立大学法人東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻教授)

研究実施期間 平成22～26年度

累計予算額 224,289千円 (うち26年度40,080千円)

予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード 浮遊砂、土地被覆変化、ダム湖、富栄養化現象、小規模水供給システム、島嶼部、水道、適応力、水道事業体

研究体制

- (1) 水循環評価に関する研究 (東京大学生産技術研究所)
- (2) 水源における水質影響評価 (国立大学法人東北大学大学院工学研究科)
- (3) 小規模水供給システムへの影響評価 (国立大学法人東京大学大学院工学系研究科)
- (4) 大都市における水道への影響評価に関する研究 (国立保健医療科学院)
- (5) 影響評価のためのトップダウン型モデルの開発 (学校法人東洋大学国際地域学部国際地域学科)

研究協力機関

国立大学法人岐阜大学

研究概要

1. はじめに (研究背景等)

2013年から14年に公表されたIPCC第5次報告書では、温暖化による気候システムに対する影響は疑う余地がなく、極端な気象現象が、生態系や水供給、インフラの損害など影響を及ぼすことが指摘されている。気候変動(温暖化)は、自然や社会に様々な影響をもたらすが、水資源の量・分布、質に対しては直接的な影響をもたらすため、水を利用する我々人間社会に対しても大きな影響がある。即ち、水資源の利用は、飲料水・生活用水、都市活動などの直接的な影響を及ぼすだけでなく、農業・食糧生産、エネルギー・産業、健康など他の分野に及ぼす影響も大きい。さらに、我が国の水資源・水利用は、高度成長期の建設・拡大期から政策的な議論も含めて大きな転換期に来ているため、気候変動を考慮した今後の指針が求められている。

そこで本研究では、水資源とその利用分野において、我が国を中心に影響の全体像(分野別の物理的・経済的影響)を把握し、適応策を評価するための高度化な影響・適応策評価モデル(ボトムアップ型モデル)を開発し、さらにトップダウン型モデルと組み合わせることで総合的な評価モデルを作成する。

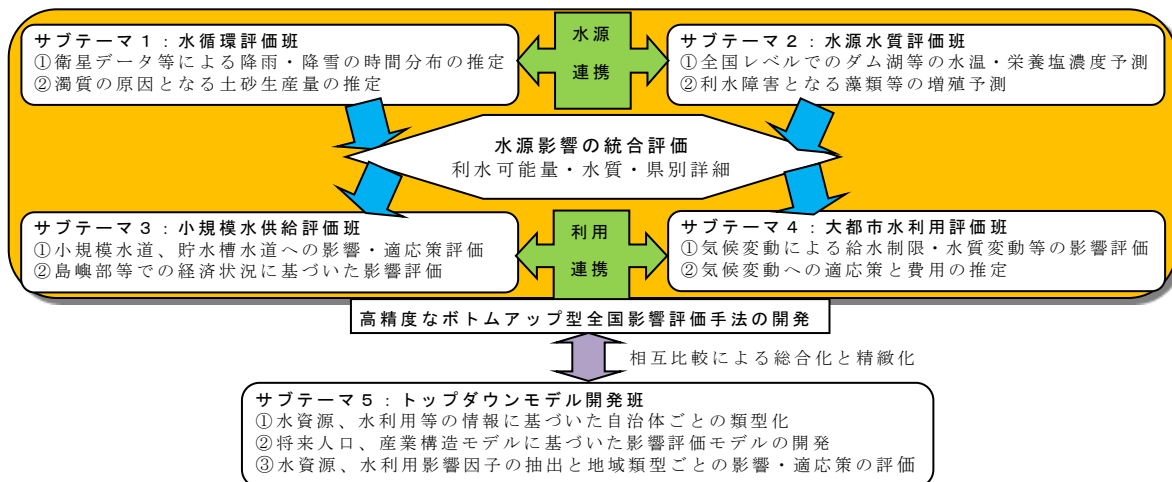


図1(3)-1 研究体制

## 2. 研究開発目的

気候変動による水資源への影響評価と適応策に関する研究では、水資源分野におけるボトムアップ型モデルとトップダウン型モデルを開発し、比較・評価並びに統合化することで、温暖化とそれに対する適応策の評価を高精度化することを目的とする。そのため、水源2、水利用2の合計4つのサブグループが、ボトムアップ型モデルの高精度化を進めるとともに、専らトップダウン型モデルを開発するサブグループを1つ設けることとした(図1(3)-1)。また、本研究の成果は、S-8戦略研究全体に貢献するとともに、水道などの行政施策にも貢献することを目標とする。

## 3. 研究開発の方法

### (1) 水循環評価に関する研究

本研究では、ボトムアップモデルのバージョンアップ及び高精度化を行い、水資源分野における将来の適応策の立案支援に繋げるため、水道事業において特に重要な濁度成分である浮遊砂、Wash loadに着目し、S-8共通シナリオにもとづくアンサンブル解析を中心に行った。具体的には、衛星観測データ及び現地観測データを用いたわが国の全国的な地理・気候学的変動把握を通じて、日本域における浮遊砂、Wash load量の変化といった水道事業に直結する項目について、国立環境研究所・総括班により整備された、GHGシナリオに基づいた気候パラメータを用いた分布型シミュレーションによるアンサンブル解析を行い、日本域内の流況の変化が浮遊砂、Wash load量に及ぼす気候変動の影響評価を行い、サブテーマ(3)、(4)との協働による水道事業に着目した影響評価への取り組みを行うとともに、農業班などに情報提供を行った。

### (2) 水源における水質影響評価

水源であるダム湖内の水質解析には、鉛直一次元解析モデルを用いた。その際、表層水温と表層水温度勾配を用いて、植物プランクトンの増殖の評価に結びつけた。この2つの指標と流入河川の栄養塩濃度(総リン濃度)を用いてクロロフィルa濃度の評価を行った。適応策としては、現在も富栄養化対策として実績がある曝気循環による湖内対策を想定した検討を実施した。またこれとは別に、地理情報を用いて、対象とした全ダム湖の集水域の流域背景を解析し、栄養塩(窒素、リン)の流入負荷の統計的な推定手法を構築した。さらに、これらの二つの解析手法を結びつけ、さらに低次生態系モデルを組み合わせて、流域負荷と湖内水質過程を表現できる解析モデルを構築した。

### (3) 小規模水供給システムへの影響評価

小規模水道事業の気候変動への適応力指標として、水道統計や業務指標などのデータを用いて複合業務指標(Combined Performance Indicator: CPI)を開発し、その結果を全国マップとして示した。また水道事業の施設や給水区域を示した水道地図と災害ハザドマップを整理・統合して水道ハザドマップを作成し、集中豪雨などの影響を評価した。島嶼部においては、水道事業体でのヒアリングと現地調査により、水資源と水運用を統合したモデルを評価し、濁水を回避するための水運用について検討した。また、そのためのエネルギー消費量を推定した。また、島嶼部において水源水質の調査を行い、水質の特徴を把握するとともに、実験により島嶼部の浄水処理に適した浄水技術の検討を行った。

### (4) 大都市における水道への影響評価に関する研究

全国規模で、工場用水の減断水による被害額の算定、藻類障害に対する大都市水道システムの適応性評価、ならびに生物障害事例とその対策実態を調査した。さらに全国の水道事業体からのデータをもとに、水源の藻類増殖による浄水処理障害の有無や、濁度と凝集剤使用率の関係を求めた。また、仙台市水道局の水源のひとつである釜房ダム流域の準分布型の水文水質モデルを作成し、降水強度増加による濁度上昇が浄水コストに与える影響の評価法を確立した。さらに、利根川の利根大堰右岸において、濁度および微生物汚染指標を調査し、河川流量・雨量との相関を調べた。

### (5) 影響評価のためのトップダウン型モデルの開発

水道事業体ごとの業務指標(PI)や自治体ごとの統計を収集整理し、水道事業体の脆弱性や適応力を評価する手法を構築するとともに、共同研究者から提供された水源における気候変動の影響や、人口などの社会変化をもとに、温暖化による影響を受けやすい水源を利用している事業体やその人口を全国レベルで抽出し、温暖化影響に関する被害を定量的に評価するフレームを構築した。

## 4. 結果及び考察

### (1) 水循環評価に関する研究

GHG排出シナリオに基づく現状1981~2000年及び2031年から2100年までの気候パラメータを用いて、土地被覆の将来変化推計及び分布型シミュレーションによるアンサンブル解析を行い、日本国内の浮遊砂、Wash loadに及ぼす気候変動の影響についてさらに影響評価を行った。国土数値情報(DNI)およ

び森林班 (FFPRI) による土地被覆情報を用いて、森林域における樹種を考慮して2090年代における土地被覆分布推計した。その結果、常緑広葉樹の割合が最大で約3倍増加する可能性が示された。さらに、複数のGHG排出シナリオに基づいて行った2040年代における単位時間当たりのWash load成分に関するアンサンブル解析では、太平洋側及び日本海側の一部で1990年代から約20%~60%の増加が示された。また、2090年代では、全国の広範囲で増加する可能性が示された。季節的な変化については、西日本では夏季及び秋季、高緯度地域で春期の変動幅が相対的に大きくなることが示唆された。

## (2) 水源における水質影響評価

水温解析に基づく将来のダム湖内のクロロフィルa濃度の予測結果からは、対象とした37ダム中、現在条件では10ダムが富栄養湖と判定されるのに対し、2100年期には21ダムと2倍以上にまで増加し、特に気温と表層水温の上昇が大きい東日本側での増加率が大きいことが予測された。適応策としての曝気循環は、藻類抑制の効果が見込まれたが、各ダム湖における曝気循環の規模や運用等の条件に関しては、より詳細な個別的検討が必要である。流域からの栄養塩負荷あるいは濃度の推定式としては、農地面積と人口密度の組合せが説明変数として適切であることが導かれた。なお、低次生態系モデルを含めたダム湖内水質解析によると、温暖化により気温および水温が上昇した影響はあまり大きくないという結果が得られた。これに対して、将来の人口減少による流域からの栄養塩負荷削減効果により、クロロフィルaは減少することが予測された。

## (3) 小規模水供給システムへの影響評価

小規模水道事業の気候変動への適応力指標として、複合業務指標 (Combined Performance Indicator: CPI) を開発し、その評価結果を全国マップとして可視化した。その結果、大規模水道事業に比べて小規模水道は技術的・財政的に課題が多く、気候変動への適応力も低いことを明らかにした。また、水道ハザードマップを作成し、水道施設が集中豪雨等による自然災害で被災する可能性を示し、特に孤立集落の発生する地域で水道施設が被災することにより断水が発生する可能性が高いことを示した。また、島嶼部の水供給への影響評価として、沖縄県を対象とした水資源量の変動と水利用を統合したモデルを作成してダム貯水率の変化を予測した結果、海水淡水化施設が渇水の回避に対して重要な役割を果たす一方で、海水淡水化施設の稼働により電力消費量が大幅に増加することを示した。また、小笠原において島嶼部の水道原水に特徴的な水質特性を明らかにし、温暖化が有機物や臭化物イオン濃度の上昇を引き起こす結果、消毒副生成物の増加が問題となることを指摘した。この問題に対して、島嶼部に適した浄水処理技術として、イオン交換法や、吸着処理と膜処理を組み合わせたハイブリッド処理が有効な処理技術であることを示した。

## (4) 大都市における水道への影響評価に関する研究

東京・埼玉などの水源である利根大堰で調査を行い、降雨による河川流量の増加は、河川水の濁度や指標微生物濃度の上昇を引き起こす一方で、水系感染性ウイルスに関しては河川流量や雨量との相関性が低く、冬季に濃度が上昇することから、季節変動要因が重要であることが示された。

断水による工業生産額の減少について全国で推定したところ、関東、東海、関西の沿岸部や、北関東や中部地方の都市において比較的大きいことがわかった。

藻類障害に対する大都市水道の適応性については、中国・四国地方、九州・沖縄地方での適応性が低い事業体の割合が50~60%と高く、他の地域でも30~40%の水道事業体は適応性が低いことが示された。また、全国の水道事業体へのアンケート調査から、全国の多くの浄水場が生物障害の問題を有することが明らかとなった。さらに、温暖化による濁度の上昇や藻類による浄水障害の対策費用を推定するため、濁度と凝集剤注入率の関係式を作成し、凝集剤注入率とその費用を予測した。

これらの算定式を用いた事例研究として、釜房ダム流域モデルを作成し、将来の降雨強度が増加した際の濁度ならびに浄水処理コスト (凝集剤、石灰、浄水発生土の運搬と処分にかかる費用) の変化を予測した。

## (5) 影響評価のためのトップダウン型モデルの開発

水道事業体の適応力を表す指標を全国レベルで適用することにより、地域や規模など事業体の類型ごとに水道事業体の温暖化への適応力を評価した。また、気候変動に伴う水源河川やダム湖の水質変化の予測結果を用いて、全国の影響人口を把握し、水道事業体への影響を定量的に予測する方法を提示した。また、適応策の評価として、ダム湖の水質改善策と水道の高度浄水処理導入の費用と効果を推計し、各地域における適応策立案の参考となる情報を作成した。

## 5. 本研究により得られた主な成果

### (1) 科学的意義

水道事業などの水利用において重要な指標である河川水中の浮遊砂及びWash load成分に着目したアンサンブル解析を行い、各種のGHG排出シナリオにおける変動の幅を示した。

温暖化による将来的なダム湖の水質予測手法を構築し、これを全国のダム湖に適用することで、全国的な富栄養化現象の発生可能性を推定することができた。

温暖な島嶼部を対象として、温暖化により有機物濃度や臭化物イオン濃度が上昇した水道原水に対して、適切な浄水処理プロセスを開発した。

断水による工業生産への影響や藻類障害から見た水道システムの適応性、ならびに濁度と凝集剤注入率の関係から浄水処理費用の上昇を全国規模で推定する方法を開発した。

上記の研究成果を統合し、全国レベルでの温暖化による水資源の量と質、並びに水利用に対する影響を評価する方法を提示した。

### (2) 環境政策への貢献

わが国における各地域の水資源の量と利用可能量に関して、気候変動の影響を考慮した今後50年～100年の変化を、S-8共通シナリオに基づくアンサンブル解析により定量的に示した。その際に、S-8森林版の研究成果に基づき将来の森林樹種の変化を考慮した降雨流出の推定を行った。また、降雨流出の予測結果をS-8農業班に提供することで、温暖化による農業への影響推定にも活用可能となった。

水源水質の変化（濁度の上昇、藻類の発生）については、各種対策の費用を比較可能な形で提示することで、政策決定者の意思決定を支援することが可能となった。

温暖化による断水の影響について、工業用水の停止による工業生産額の減少を全国レベルで評価した。これにより、各自治体が、工業用水の停止による被害額を具体的に把握することが可能となった。

全国の水道事業の温暖化に対する適応力を評価する方法として、水道施設の整備水準や、水源の種類、財政能力などを複合的に加味して評価する複合業務指標（CPI）を提案し、全国の水道事業に適用した。これにより、全国の水道事業体の温暖化適応力を地図上に示すとともに、各水道事業体がそれぞれの温暖化適応力を相対的に比較し、適応策立案に役立てることが可能となった。

小規模水道の温暖化適応策導入に関する課題を施設水準や財政など多面的に評価し、その結果を比較可能な形で示した。また、豪雨災害による影響を水道ハザドマップで示すとともに、独居老人の割合や、人口の将来変化とともに図示することで、市民や政策担当者に分かりやすい形式で将来の社会的な課題と温暖化対策の必要性を総合的に視覚的に示し、政策決定の優先順位付けに有用な情報を提供した。

#### <行政が既に活用した成果>

東京都水道局が、温暖化対策を検討するにあたり、本研究の成果を引用し、ヒアリングなどに協力した。

#### <行政が活用することが見込まれる成果>

将来の河川水の濁度上昇や、ダム湖の藻類増殖による利水障害に対して、本研究の成果を参照し、適切な対策を講じることができる。

断水被害や、濁度上昇による浄水コストの増加を推定することで、それらの回避するための施策を、コスト面から評価することができる。

島嶼部など、浄水処理が困難な地域において、本研究で示した浄水技術の評価結果を、新しい浄水処理方法採否の参考とすることができる。

## 6. 研究成果の主な発表状況

### (1) 主な誌上発表

#### <査読付き論文>

- 1) 梅田信、落合雄太：土木学会論文集G（環境）、68, I\_127-I\_135（2012）  
「気候変動による国内ダム湖水質への影響評価」
- 2) G. MOURI, V. GOLOSOV, S. CHALOV, S. TAKIZAWA, K. OGUMA, K. YOSHIMURA, M. SHIIBA, T. HORI and T. OKI: Global and Planetary Change, 102C, 1-9（2013）DOI: 10.1016/j.gloplacha.2013.01.002  
“Assessment of potential suspended sediment yield in Japan in the 21st century with reference to the general circulation model climate change scenarios”
- 3) N. KISHIDA, Y. KONNO, K. NEMOTO, T. AMITANI, A. MAKI, N. FUJIMOTO and M. AKIBA: Water Science

- and Technology: Water Supply, 13(5), 1228-1235 (2013)  
 “Recent trends in microorganism-related off-flavor problems in drinking water treatment systems in Japan”
- 4) 桑原亮、梅田信：土木学会論文集B1（水工学），71，I\_745-I-750（2015）  
 「流域背景に基づくダム湖流入河川の栄養塩濃度および負荷量の統計的解析」
- 5) 大山秀格、川本圭彦、小池亮、森本達男、小熊久美子、荒巻俊也、滝沢智：土木学会論文、70(7), III\_131-III\_140（2014）  
 「水道経営指標群を用いた気候変動に対する適応力評価手法の検討」
- 6) J. LOHWACHARIN, Y. YANG, N. WATANABE, A. PHETRAK and S. TAKIZAWA: Water Science and Technology: Water Supply, 14(1), 165-172 (2014) doi:10.2166/ws.2013.185  
 “Removal of DOM and AOC in a full-scale advanced water treatment plant: effects of operational periods of BAC filters”
- 7) G. MOURI: Environmental Science and Policy 50C, 74-87 (2015) DOI: 10.1016/j.envsci.2015.02.004  
 “Assessment of land cover relocation incorporating the effects of human activity in typical urban and rural catchments for the design of management policies”
- 8) 小保内啓太、下ヶ橋雅樹、秋葉道宏：水道協会雑誌（印刷中、2015年5月号掲載予定）  
 「水文水質モデルを用いた釜房ダム流域における豪雨による高濁度化の浄水処理システム影響評価」  
 <査読付論文に準ずる成果発表>  
 特に記載すべき事項はない。

## （2）主な口頭発表（学会等）

- 1) 渡辺直子、矢部博康、小池亮、森本達男、荒巻俊也、滝沢 智：第19回地球環境シンポジウム講演（2011）  
 「業務指標を用いた気候変動に対する小規模水道事業体の脆弱性評価」
- 2) 切川徹哉、石橋健二、小坂浩司、山田俊郎、秋葉道宏：第63回全国水道研究発表会（2012）  
 「業務指標を用いた水道システムの脆弱性評価」
- 3) A. PHETRAK: 5th IWA Specialist Conference on Natural Organic Matter Research (2013)  
 “Removal of Disinfection by - Products Precursors from Low - SUVA Water by Anion Exchange Resins”
- 4) M. UMEDA, Y. ISHIYAMA, Y. OCHIAI: Joint Aquatic Science Meeting (2014)  
 “Influence of Climate Change on Phytoplankton Growth in Reservoirs in Japan”
- 5) 荒巻俊也：環境情報科学センター 第126回環境サロン（2014）  
 「気候変動が及ぼす将来の水資源分野への影響」
- 6) 向田清峻、守利悟朗：第62回日本生態学会大会（2015）  
 「全国の河川流域におけるL-Q式を用いた浮遊土砂量の推定」

## 7. 研究者略歴

課題代表者：滝沢 智

東京大学大学院博士課程修了、工学博士、現在、東京大学大学院工学系研究科教授

- 1) 沖 大幹  
 東京大学大学院修士課程修了、博士（理学）、現在、東京大学生産技術研究所教授
- 2) 梅田 信  
 東京工業大学理学部卒業、博士（工学）、現在、東北大学大学院工学研究科准教授
- 3) 秋葉 道宏  
 東北学院大学工学部卒業、博士（工学）、現在、国立保健医療科学院統括研究官
- 4) 荒巻 俊也  
 東京大学大学院博士課程修了、博士（工学）、現在、東洋大学国際地域学部教授

## S-8-1 我が国全体への温暖化影響の信頼性の高い定量的評価に関する研究

### (3) 気候変動による水資源への影響評価と適応策に関する研究

#### ① 水循環評価に関する研究

国立大学法人東京大学

生産技術研究所

沖 大幹

<研究協力者>

国立大学法人東京大学

生産技術研究所

守利 悟朗

平成22～26年度累計予算額：37,996千円

(うち、平成26年度予算額：6,799千円)

予算額は、間接経費を含む。

#### [要旨]

本研究では、IPCC報告書による知見を背景として、水資源とその利用分野における影響を全国レベルで把握し、適応策を定量的に評価することを目的とし、人間活動において重要な水道事業に着目し、温暖化影響評価モデルを開発して土地利用の将来変化を考慮した流量、濁度成分の影響評価を行い、水源と水利用のサブグループなどとの協働による水道などの行政施策にも貢献する情報提供を行った。

具体的には、複数のGHG排出シナリオとS-8共通シナリオに基づいて行った2040年代のWash load成分に関するアンサンブル解析では、太平洋側及び日本海側の一部で1990年代から約20%～60%の増加が示された。また、2090年代では、全国の広範囲で増加し、季節変動には各GHGシナリオで幅があり、減少するケースもあることを示した。

#### [キーワード]

濁度、土地被覆変化

### 1. はじめに

IPCC第4次報告書から5次報告書にかけて取りまとめられた知見のなかでは、気候変動に関する負の誘因として、人間活動によるGHG排出量の変化による影響の重要性とともに、緩和策だけではなく適応策の重要性が述べられている。水資源分野においては、気候システムの変化による極端現象の増加、水収支の変化のほか水質の変化などによる環境および社会システムへの影響が懸念されており、我が国においても、将来の全体像を把握し、適応策に資する新しい知見が求められている。

### 2. 研究開発目的

本研究では、以上の背景にもとづき、水資源分野の中でも重要な水道事業に着目して、複数のGHG排出シナリオを用いた土地利用および流量の将来変化の推計を考慮して、濁度成分を中心とした影響評価を進めるとともに、水源と水利用のサブグループなどとの協働による水道などの行

政施策にも貢献する情報提供を行うこととした。

### 3. 研究開発方法

本研究では、水資源分野における将来の適応策の立案支援に繋げるため、水道事業において特に重要な濁度成分である浮遊砂及びWash loadに着目し、S-8共通シナリオにもとづくアンサンブル解析を中心に行った。具体的には、衛星観測データ及び現地観測データを用いたわが国の全国的な地理・気候学的変動把握を通じて、日本域におけるWash load量の生産及び流量の変化といった水道事業において特重要な項目について、国立環境研究所・総括班により整備された、複数のGHG排出シナリオを用いた、将来の土地被覆変化の推計、分布型シミュレーションによるアンサンブル解析を行い、日本域内の流況の変化が浮遊砂及びWash load量に及ぼす気候変動の影響評価を行い、他グループとの協働による水道事業に着目した影響評価への取り組み並びに農業班などに情報提供を行った。

### 4. 結果及び考察

これまでに整備されたAMeDAS (Automated Meteorological Data Acquisition System)、MIROC (Model for Interdisciplinary Research on Climate)及びMRI-GCM (Meteorological Research Institute General Circulation Model)に加えて、HadGEM (Hadley Centre Global Environment Model)およびGFDL (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory)に基づく現状1981～2000年及び2031年から2100年までのS-8共通シナリオデータを用いて、分布型シミュレーションによるアンサンブル解析を行い、日本国内の浮遊砂及びWash loadに及ぼす気候変動の影響について、さらに影響評価を行った。図1(3)①-1に国土数値情報(DNI)および森林班(FFPRI)を用いた、森林域における樹種を考慮して推定された1990年代における土地被覆分布を示している。また、図1(3)①-2に将来のシナリオデータに基づき推計された樹種の割合を示しており、GHG排出量の高いシナリオでは、現状と比較して、特に常緑広葉樹の割合が最大で3倍程度増加する可能性が示唆された。図1(3)①-3は、MIROC、MRI-GCM、HadGEM及びGFDLシナリオに基づいて行われた2040年代における単位時間当たりのWash load量のアンサンブル解析結果について、1990年代を基準とした変化率の分布を示しており、太平洋側及び日本海側の一部で約20%～60%の増加が示された。また、2090年代では、広い地域で増加の可能性が示された(図1(3)①-4)。季節的な変化においては、西日本では夏季及び秋季、高緯度地域で春期の変動幅が相対的に大きくなることが示唆された。

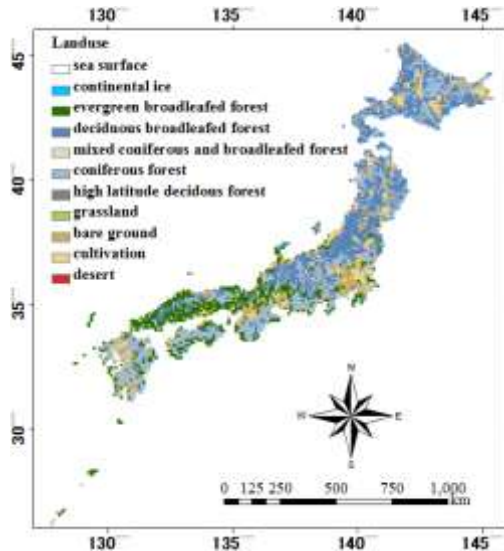


図1(3)①-1 1990年代における土地利用分布

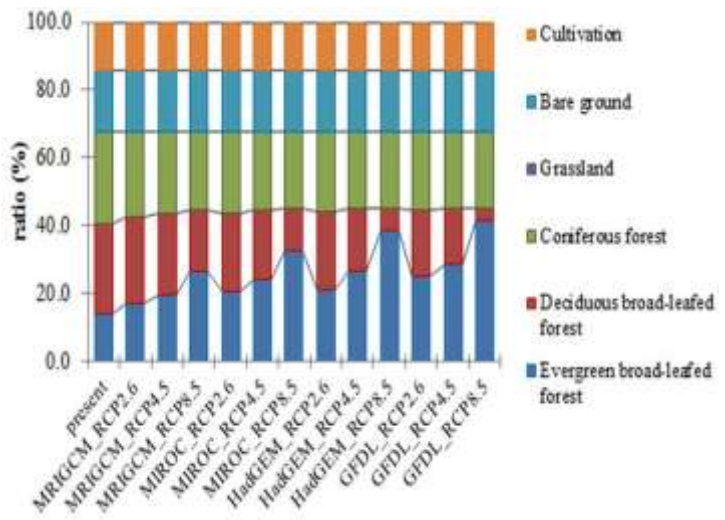


図1(3)①-2 MRI-GCM、MIROC、HadGEMおよびGFDL気候シナリオにもとづく土地被覆率の将来変化の推計結果

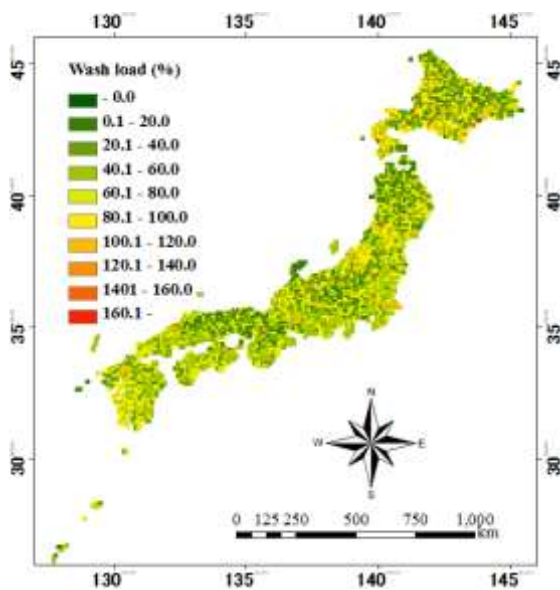


図1(3)①-3 S-8 GHG排出シナリオに基づくWash loadのアンサンブル解析結果(2040年代)

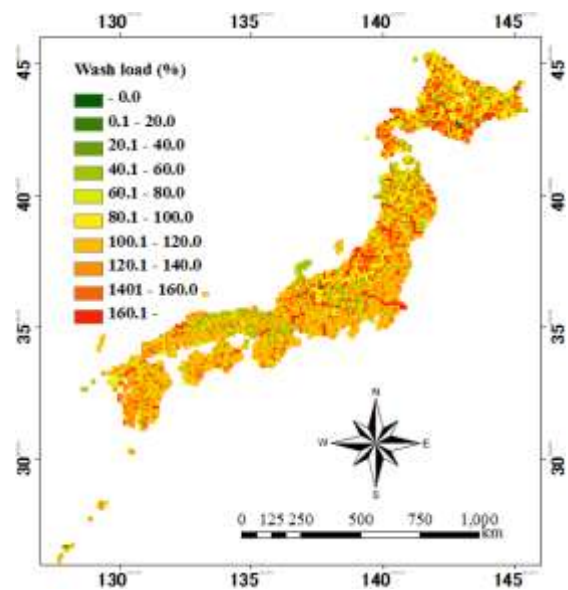


図1(3)①-4 S-8 GHG排出シナリオに基づくWash loadのアンサンブル解析結果(2090年代)

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

本研究の科学的意義は、水道事業において特に重要なWash load成分に着目し、将来の土地利用および水量の変化を考慮したアンサンブル解析を行い、GHG排出シナリオにおける変動の幅を示した。濁度成分の変化は、水量に対して指数関数的に変化すると考えられるため、水道事業においても重要な要素であることが示唆された。また国内の代表的な都市および地方域における窒素循環解析から、土地利用の変化と水質との関係性を示した。



## (2) 環境政策への貢献

### <行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

### <行政が活用することが見込まれる成果>

わが国における各地域の水資源・水利用可能量に関して、気候変動の影響を受けて今後50年～100年といった時間スケールにおいてどのように変化するかを、S-8共通シナリオに基づいてアンサンブル解析により定量的に示した。そして、他グループおよび農業班などと協働し、特に水道事業に着目した適応策の立案支援につながる情報提供を行った。

## 6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### <論文(査読あり)>

- 1) G. MOURI, M. SHIIBA, T. HORI and T. OKI: Geomorphology, 125(2), 282-292 (2011) DOI: 10.1016/j.geomorph.2010.10.008.  
 “Modeling shallow landslides and river bed variation associated with extreme rainfall-runoff events in a granitoid mountainous forested catchment in Japan”
- 2) G. MOURI, M. SHIIBA, T. HORI and T. OKI: Japan, Geomorphology, 125(2), 263-270 (2011) DOI: 10.1016/j.geomorph.2010.09.026.  
 “Modeling reservoir sedimentation associated with an extreme flood and sediment flux in a mountainous granitoid catchment”
- 3) G. MOURI, S. TAKIZAWA and T. OKI: Journal of Environmental Management, 92(7), 1837-1848 (2011) DOI: 10.1016/j.jenvman.2011.03.005.  
 “Spatial and temporal variation in nutrient parameters in stream water in a rural-urban catchment, Shikoku, Japan: Effects of land cover and human impact”
- 4) G. MOURI, S. KANAE and T. OKI: Atmospheric Research, 101(1-2), 164-177 (2011) DOI: 10.1016/j.atmosres.2011.02.002.  
 “Long-term changes in flood event patterns due to changes in hydrological distribution parameters in a rural-urban catchment, Shikoku, Japan”
- 5) G. MOURI, S. SHINODA and T. OKI: Environmental Modelling & Software, 32C, 16-26 (2012) DOI:10.1016/j.envsoft.2011.11.018.  
 “Assessing environmental improvement options from a water quality perspective for an urban-rural catchment”
- 6) G. MOURI, S. SHINODA, V. GOLOSOV, M. SHIIBA, T. HORI, S. KANAE, S. TAKIZAWA and T. OKI: Urban Climate, 1C, 40-54 (2012) DOI: 10.1016/j.uclim2012.08.002.  
 “Ecological and hydrological responses to climate change in an urban - forested

- catchment, Nagara River basin, Japan”
- 7) G. MOURI, D. MINOSHIMA, V. GOLOSOV, S. CHALOV, S. SETO, K. YOSHIMURA, S. NAKAMURA and T. OKI: *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 3C, 31-43 (2012) DOI: 10.1016/j.ijdrr.2012.11.003.  
 “Probability assessment of flood and sediment disasters in Japan using the Total Runoff-Integrating Pathways model”
- 8) G. MOURI, S. SHINODA and T. OKI: *Ecological Complexity*, 15C, 83-96 (2013) DOI: 10.1016/j.ecocom.2013.04.001.  
 “Assessment of the historical environmental changes from a survey of local residents in an urban-rural catchment”
- 9) G. MOURI, S. TAKIZAWA, K. FUKUSHI and T. OKI: *Sustainable Cities and Society*, 9C, 23-31 (2013) DOI: 10.1016/j.scs.2013.02.003.  
 “Estimation of the effects of chemically-enhanced treatment of urban sewage system based on life-cycle management”
- 10) G. MOURI, V. GOLOSOV, S. CHALOV, B. VLADIMIR, M. SHIIBA, T. HORI, S. SHINODA and T. OKI: *CATENA*, 104C, 174-185 (2013) DOI: 10.1016/j.catena.2012.11.008.  
 “Assessing the effects of consecutive sediment-control dams using a numerical hydraulic experiment modelling river-bed variation”
- 11) G. MOURI, V. GOLOSOV, S. Chalov, S. Takizawa, K. OGUMA, K. Yoshimura, M. SHIIBA, T. HORI and T. OKI: *Global and Planetary Change*, 102C, 1-9 (2013) DOI: 10.1016/j.gloplacha.2013.01.002.  
 “Assessment of potential suspended sediment yield in Japan in the 21st century with reference to the general circulation model climate change scenarios”
- 12) G. MOURI, V. GOLOSOV, M. SHIIBA and T. HORI: *Environmental Pollution*, 187C, 31-41 (2014) DOI: 10.1016/j.envpol.2013.12.018.  
 “Assessment of the caesium-137 flux adsorbed to suspended sediment in a reservoir in the contaminated Fukushima region in Japan”
- 13) G. MOURI, S. SHINODA, V. GOLOSOV, S. CHALOV, M. SHIIBA, T. HORI and T. OKI: *Journal of Environmental Management* 138C(1), 24-31 (2014)  
 “Estimating the collapse of aggregated fine soil structure in a mountainous forested catchment”
- 14) G. MOURI, F. C. ROS and S. CHALOV: *Geomorphology* 213C, 266-276 (2014)  
 “Characteristics of suspended sediment and river discharge during the beginning of snowmelt in volcanically-active mountainous environments”
- 15) G. MOURI: *International Journal of Sustainable Built Environment* 3C(1), 47-53 (2014)  
 “An academic goal of socio-ecological sustainability: A comprehensive review from a millennial-scale perspective.”
- 16) G. MOURI: *Environmental Science and Policy* 50C, 74-87 (2015)  
 “Assessment of land cover relocation incorporating the effects of human activity

in typical urban and rural catchments for the design of management policies”

#### <査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

#### <その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない。

#### (2) 口頭発表（学会等）

- 1) 守利悟朗：第45回日本水環境学会・ノンポイント汚染研究委員会総会（2012）（招待講演）  
「流域水文生態系モデリングに関する最近の研究の取り組みについて」
- 2) G. MOURI: Moscow State University, Moscow, Russia (2012)（招待講演）  
“Sediment yield and transfer in extreme mountainous environment in Japan”
- 3) N. FUKUBAYASHI, T. OKI, K. YOSHIMURA, G. MOURI, S. NAKAMURA, S. SETO: AOGS-AGU(WPGM)  
(2012)  
“Water-related disaster risk evaluation in Japan under the present and a future climate”
- 4) F. C. ROS, G. MOURI：第61回日本生態学会大会（2014）  
“Hydrologic system, suspended sediment and river discharge in extreme volcanic environment”
- 5) F. C. ROS, G. MOURI：水文・水資源学会2014年度研究発表会（2014）  
“Suspended Sediment and River Discharge in Extreme Volcanic Environment Catchment”
- 6) 守利悟朗、中尾勝洋：土木学会平成26年度全国大会、第69回年次学術講演会（2014）  
「気候変動による森林樹種分布の変化による流出量への影響評価」
- 7) F. C. ROS, G. MOURI: Tokyo Conference on International Study for Disaster Risk  
Reduction and Resilience (2015)  
“Water and Sediment-Related Extreme Event in the Western Pacific Region”
- 8) 向田清峻、守利悟朗：第62回日本生態学会大会（2015）  
「全国の河川流域におけるL-Q式を用いた浮遊土砂量の推定」

#### (3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

#### (4) 「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない。

#### (5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

- 1) 守利悟朗、公益財団法人クリタ水・環境科学研究優秀賞(2011年8月)

8. 引用文献

特に記載すべき事項はない。

## S-8-1 我が国全体への温暖化影響の信頼性の高い定量的評価に関する研究

### (3) 気候変動による水資源への影響評価と適応策に関する研究

#### ② 水源における水質影響評価

国立大学法人東北大学

大学院工学研究科

梅田 信

平成22～26年度累計予算額：35,003千円

(うち、平成26年度予算額：5,801千円)

予算額は、間接経費を含む。

#### [要旨]

本研究では、水道水源としてダム湖を取り上げ、全国レベルで温暖化の影響評価を行うためのモデルを開発し、水道利用を持つ多数のダム湖を対象とした富栄養化現象についての予測評価を実施した。また、適応策として湖内対策を想定した検討を行った。

本研究における将来予測では、ダム湖の集水域における人口減少にともなう栄養塩の排出負荷量によるダム湖流入水質の変化と、気象条件変化によるダム湖の水温変化に伴う植物プランクトンの増殖環境の変化とに分けて検討を行った。流入水質の変化については、各対象ダムの集水域を抽出し、各種のデータベース等から、土地被覆や流域人口を推計し、既往の実測水質との関係から、経験的な予測式を作成した。ダム湖内の富栄養化現象に関わる検討に関しては、湖内の表層水温および水温成層の形成条件から、クロロフィルaを予測する手法を構築した。これを全国37の多目的ダムに適用して予測検討を行った。その結果、特に北日本で富栄養湖と判定されるダムの増加率が高いことが分かった。また適応策として、曝気循環を考慮したところ、クロロフィルa濃度にして平均で約 $2\mu\text{g}/\text{l}$ の低減が見込まれるなど効果が発揮されることが分かった。

#### [キーワード]

ダム湖、富栄養化

#### 1. はじめに

地球温暖化の影響は世界的に顕在化しつつあり、様々な分野への影響が懸念されている。水資源に対する温暖化の影響は、質と量の両方に対して現れることが示唆されているが、このような影響は、生活用水や飲料水の供給に対する影響だけでなく、農業、産業、健康などの多くの分野に対しても影響が現れると考えられる。そのため、水資源の特に水質面における温暖化の影響を検討しておくことは重要であると考えられる。一方で、ダム湖は日本における水道水源のほぼ半分を担っている。しかし河川などとは異なり、閉鎖的な環境をもつため、このような閉鎖性水域で生じた水質悪化の影響は、蓄積され解消されにくいと考えられる。そのため、水質悪化の兆候について予め検討し、予測しておくことは、今後の水資源管理を考える上で必要であると考えられる。また、将来の水資源環境を考える際に、人口減少のような社会環境変化についても考慮に入れておく必要があると考えられる。

そこで本研究では、全国的な多数のダム湖を対象として、まず集水域の環境変化について検討

を行った。その上で、気候変動によるダム湖内の水質変化についての予測・展望を行った。

## 2. 研究開発目的

気候変動による水資源への影響評価と適応策に関する研究のうち、本テーマでは、水源水質を対象とした予測検討モデル開発を行い、さらに将来環境におけるダム湖水質の予測並びに適応策の評価を行うことを目的とした。また本研究の成果は、S-8戦略研究全体に貢献するとともに、水道などの行政施策にも貢献することを目標とする。

## 3. 研究開発方法

### (1) ダム湖の流入栄養塩負荷予測

ダム湖の水質悪化が進行すると、上水道の利用に影響を与えると予測される。また、水質と流域背景の関係を検討するために用いるデータが十分に入手可能な必要がある。このことから、国土交通省および水資源機構が管理し、利用目的に上水道がある多目的ダムのうち、流入河川の栄養塩濃度の実測値が得られた65のダムを研究対象とした。

本研究では、GISを用いて、ダム湖の集水域の生成および流域背景の解析を行った。集水域の生成には、国土交通省の基盤地図情報のうち、10mメッシュの数値標高モデルを用いた。

ダム湖の流域人口は、S-8共通の社会経済シナリオに基づいて作成された人口シナリオデータを用いた。土地利用形態の抽出には、国土交通省が提供している国土数値情報の土地利用細分メッシュデータを使用した。ただし、土地利用データは、1997年もしくは2009年に作成されたもののうち、流入河川の栄養塩濃度データと近い年のものをダムごとに選択している。

流入負荷量は、流入水量と栄養塩濃度の積である。栄養塩の流出には降水が大きく関係することや、予測の際に気候変動の影響も考慮可能であることから、式(1)による負荷量の検討を行った。

$$L = CA \cdot R \cdot C \quad (1)$$

ここで、Lは栄養塩負荷量の計算値、CAは集水面積、Rは降水量、Cは栄養塩濃度である。目的変数Lは、水文水質データベースの流入水量の実測値と、栄養塩濃度の実測値から算出した。Rは、国土数値情報の平年値メッシュデータの年間降水量である。Cは回帰分析で作成した式により求めた。

### (2) ダム湖内水質予測

ダム湖内の水質予測方法としては、鉛直一次元の水温解析をベースとする手法を用いた。これは、水平方向には水温が一樣であると仮定して解析を行う方法である。本検討において、ダム湖の水温成層状況の変動についての解析が重要である。また、全国にある多数の貯水池を対象とするため、複数の条件設定による計算を実施する必要がある。さらに年間を通じた水温鉛直分布の変動を解析することができることから鉛直一次元の水温解析を採用した。

水温の解析結果を水質（植物プランクトン存在量）の評価と結びつける指標としては、表層水温と表層水温勾配を用いた。本検討においては、植物プランクトンの増殖に関わる水質問題を想定しているが、上記の指標は、藍藻類の異常増殖とそれに伴う水質問題の発生に関わる評価指標

として有用であることが、既往研究においても指摘されている。一つ目の表層水温は、20℃以上になるとアオコの代表的な原因種であるMicrocystis属の現存量が顕著に増加するという知見があることから、20℃を目安として評価した。2つ目の表層水温勾配は、アオコの発生水深と考えられる水深5mまでに、概ね0.5℃/m以上の水温勾配があると、アオコが発生する可能性が高まることが知られている。本研究では、この2つの評価指標と流入河川の栄養塩濃度（総リン濃度）の実測データを用いて、クロロフィルa濃度の評価を行った。

適応策には、現在、比較的多くのダム湖において用いられている曝気循環を用いることとした。曝気循環は、水温成層を破壊することによって、富栄養化現象に伴うアオコを抑制する対策である。このため、曝気循環は本研究で対象としているような、水温上昇あるいは水温成層強度の上昇の観点からは、最も妥当な適応策と考えられる。これを、本研究で用いた鉛直次元解析に組み込み、温暖化による水温上昇の影響緩和について検討した。

このような研究手法を用いて、将来予測を実施した。検討したケースは、S-8共通シナリオに基づき、表1(3)②-1のようなケースについて検討を実施した。気候モデルについては4モデル、排出シナリオについては3つ、適応策については有無の2ケースで、計24ケースの検討を行った。

表1(3)②-1 ダム湖水質予測計算の実施条件

項目	検討対象
GCM	MIROC 5.0, MRI-GCM 3.0, GFDL CM3, HadGem 2ES
RCP	2.6, 4.5, 8.6
適応策	なし, あり (曝気循環)
年代	2000年期(1981-2000), 2050年期(2031-2050), 2100年期(2081-2100)

#### 4. 結果及び考察

##### (1) ダム湖の流入栄養塩負荷予測

本解析は、研究対象の65ダム湖のうち間接集水域を含まない52ダム湖で行った。重回帰分析を行い、流入河川の年平均TP濃度を推定する回帰式を作成した。変数選択法には変数増減法を採用し、変数の採否基準としてF値を有意確率に換算したP値0.05を用いた。

$$C_p = 0.009 + 2.7 \times 10^{-4} D_p + 0.14 R_a \quad (2)$$

ここで、 $C_p$ は流入河川の平均TP濃度(mg/l)、 $D_p$ は人口密度(人/km<sup>2</sup>)、 $R_a$ は農地の割合である。決定係数は0.77であり、比較的高い再現性を確認した。次に、総窒素についても上記と同様の手法で検討を行い、推定式(3)を作成した。

$$C_N = 0.27 + 2.6 \times 10^{-3} D_p + 4.1 R_a \quad (3)$$

ここで、 $C_N$ は流入河川の平均TN濃度(mg/l)、 $R_a$ は農地の割合である。決定係数は0.55と、TP濃度の推定式(2)よりも低い結果となった。

研究方法の式(1)に記した方法により、年間流入負荷量に関して検討した。その結果、以下の式が得られた。

$$L_N = 0.615 A \times R \times (0.27 + 0.05 R_a) \quad (4)$$

$$L_p = 0.623A \times R \times (9.0 \times 10^{-3} + 0.27 \times 10^{-4} D_p + 0.14 R_a) \quad (5)$$

ここで、 $L_N$ と $L_P$ は、それぞれTNとTPの年間負荷量 (kg/年)、 $A$ は集水面積 (km<sup>2</sup>)、 $R$ は年間降水量(mm/年)である。図1(3)②-1は再現性を両対数グラフで確認したものである。再現の精度を示す決定係数は、リンと窒素でそれぞれ0.93と0.72であった。また、気候因子である降水量と、人為的な因子の農地の2つが変数に含まれているため、将来予測をする際にはより信頼性の高い結果が得られると考えられる。

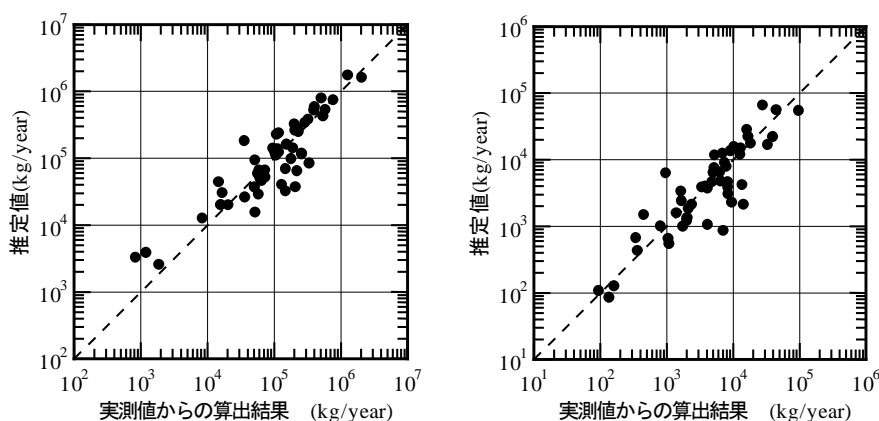


図1(3)②-1 年間負荷量の算出結果 (左図：TN, 右図：TP)

## 2) ダム湖内の水質予測結果

ダム湖の湖内水質 (クロロフィルa濃度) の検討結果を図1(3)②-2と図1(3)②-3に示す。この図に示したのは、検討ケースのうち代表的なものであり、気候モデルにはMIROC5.0とMRI-GCM3.0を、排出シナリオはRCP8.5を用いた。また、曝気の湖水循環については、なし・ありをそれぞれ左右に示した。また、各ダムの所在地点付近にクロロフィルa濃度の計算結果の棒グラフを配置し、各年代別の予測結果を並べている。多くの対象ダムにおいて、年代が進むにつれてクロロフィルa濃度が上がっており、温暖化に伴って、藻類増殖による水質悪化あるいは利水障害の可能性が高まることが示唆された。また、適応策としての曝気循環を考慮することにより、適応策無しの場合よりもクロロフィルa濃度が概ね低下することが予測された。

また図1(3)②-4は、2つのGCMについて、全対象ダムにおけるクロロフィルaの平均値を、年代別、排出シナリオ別、および適応策の有無の別について、比較して示したものである。この結果によると、適応策を考慮した場合、全体の平均で約2 μg/lのクロロフィルa濃度の低下が見込まれた。



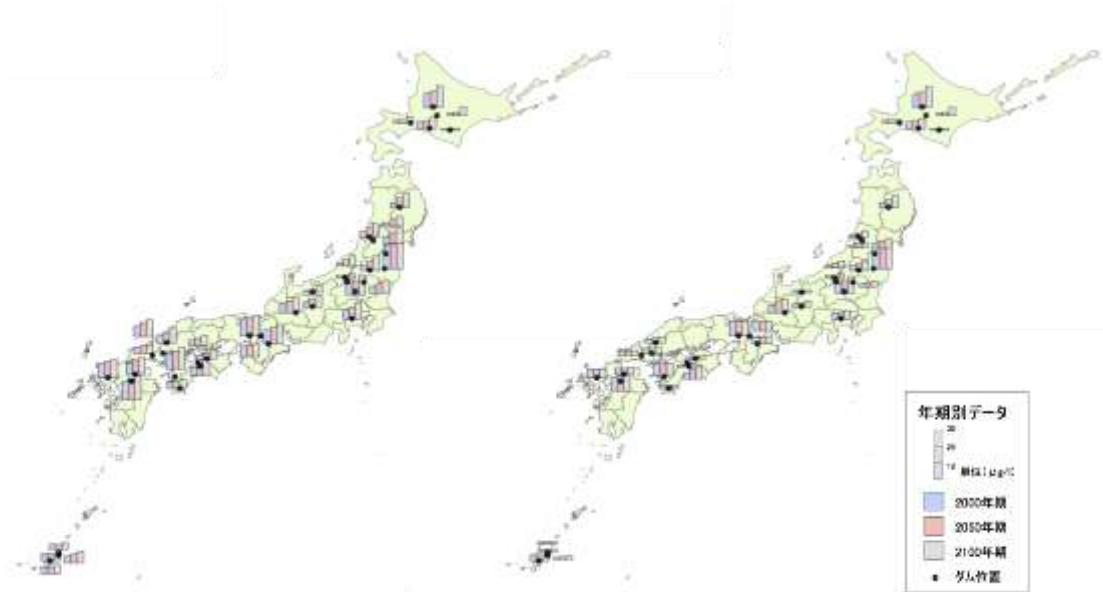


図1(3)②-2 対象ダム湖におけるクロロフィルa濃度の予測結果  
GCM: MIROC 5、 RCP: 8.5. 適応策：なし（左図）、あり（右図）

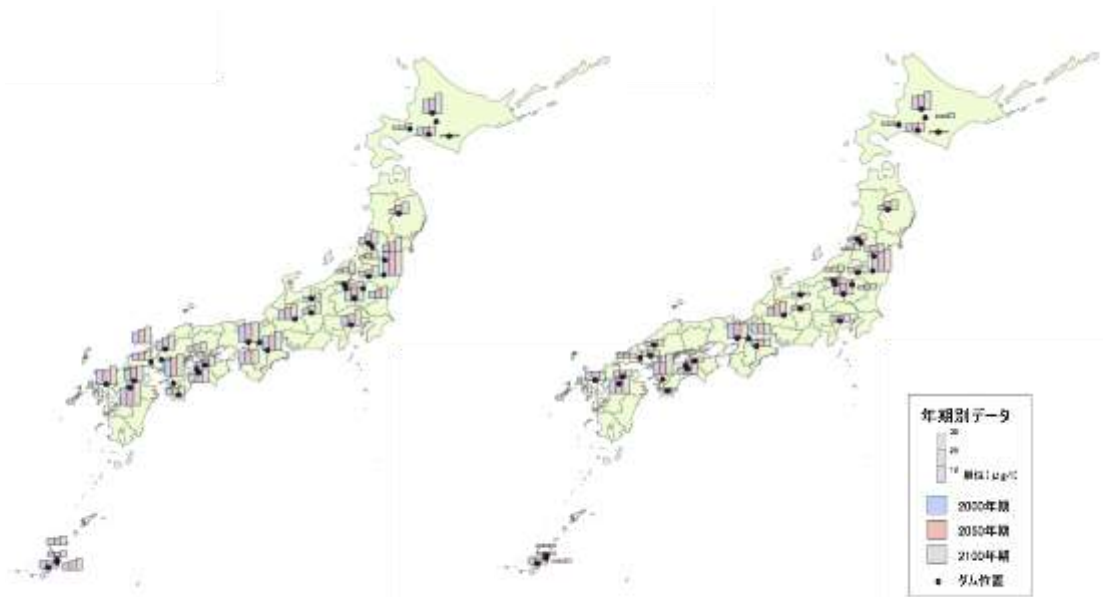


図1(3)②-3 対象ダム湖におけるクロロフィルa濃度の予測結果  
GCM: MRI-GCM 3、 RCP: 8.5. 適応策：なし（左図）、あり（右図）

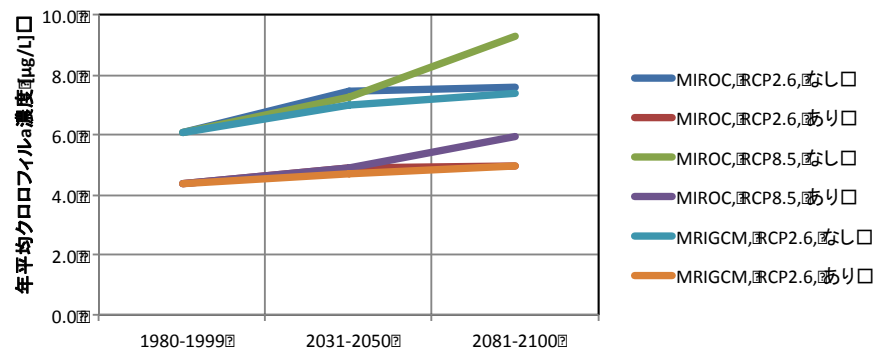


図1(3)②-4 年平均クロロフィルa濃度の全対象ダムに対する平均値

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

本研究の科学的意義は、ダム湖は日本における水道水源のほぼ半分を担っているが、閉鎖的な環境であり、水が湖内で滞留するため、通常河川と比較して水質変化が現れやすい特性を持つ。このような課題に対し、本研究では全国多数のダム湖を対象に、S-8共通シナリオに基づいた複数の条件設定から、将来の富栄養化に関する評価を行った。このような研究事例は前例がないものと考えられる。また、温暖化の進行によるダム湖内の富栄養化に対する湖内対策による適応策に関しても、限定された適応策の条件ではあるが、効果検討を行うことができた。

### (2) 環境政策への貢献

#### <行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

#### <行政が活用することが見込まれる成果>

近年、ダム湖の藻類増殖による水質障害の発生が増加傾向にあるかのように見られるため、本研究の成果を参照しながら、将来的な水質管理の方向性を検討する際の参考となりうる。

## 6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### <論文(査読あり)>

- 1) D. H. THUAN, M. UMEDA, M. MATSUKAWA, and H. TANAKA: Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, 56, I\_289-I\_294 (2012)  
“Prediction Model of Taste-and-Odor Events in Kamafusa Reservoir”
- 2) 梅田信、落合雄太: 土木学会論文集 G (環境)、68, I\_127-I\_135 (2012)  
「気候変動による国内ダム湖水質への影響評価」

- 3) 桑原亮、梅田信：土木学会論文集 G（環境）、69, I\_123-I\_129（2013）  
「国内のダム湖における流入河川の水質と流域背景に関する統計的評価と将来展望」
- 4) 桑原亮、梅田信：土木学会論文集 B1（水工学）、71, I\_745-I\_750（2015）  
「流域背景に基づくダム湖流入河川の栄養塩濃度および負荷量の統計的解析」

#### <査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

#### <その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 落合雄太、梅田信：東北地域災害科学研究、47, 141-146（2011）  
「水理学的条件の異なるダム湖における水温分布の再現計算」
- 2) 梅田信：水環境学会誌、35(11), 363-367（2012）  
「地球温暖化による閉鎖性水域の水温」
- 3) 桑原亮、梅田信：東北地域災害科学研究、49, 121-126（2013）  
「国内のダム湖に流入するリン濃度と流域背景の関係評価」
- 4) R. KUWAHARA and M. UMEDA: Proceedings of the 19th IAHR-APD Congress (2014)  
“Statistical Analysis on Inflowing River Water Quality of Reservoirs in Japan in Relation to Watershed Conditions”

#### (2) 口頭発表（学会等）

- 1) 落合雄太、梅田信：東北地域災害科学研究集会（2011）  
「水理学的条件の異なるダム湖における水温分布の再現計算」
- 2) M. UMEDA, A. SUZUKI, M. MATSUKAWA, F. KIMURA: IWA-ASPIRE (2011)  
“Numerical Prediction for Off-flavor Compounds in Kamafusa Reservoir”
- 3) M. UMEDA: Tunisian Japanese Symposium on Science, Society and Technology 2011 (2011)  
“Analysis on Time Variation of Off-Flavor Compound in Kamafusa Reservoir”
- 4) 堀井貴之、梅田信：平成23年度東北地域災害科学研究集会（2011）  
「三春ダムの曝気施設により生じる流動観測」
- 5) 堀井貴之、梅田信：土木学会東北支部技術研究発表会（2011）  
「三春ダム貯水池内の曝気循環による流動と水質への影響」
- 6) 落合雄太、梅田信：土木学会東北支部技術研究発表会（2011）  
「気候変動による全国のダム湖に対する水質影響評価」
- 7) 梅田信、落合雄太：地球惑星科学連合大会（2012）  
「気候変動によるダム湖水質への全国的影響評価」
- 8) M. UMEDA, Y. OCHIAI: Annual Meeting of Asia Oceania Geosciences Society (2012)  
“Influence of Climate Change to Water Temperature in Reservoirs in Japan”
- 9) 梅田信、落合雄太：土木学会年次学術講演会（2012）  
「ダム湖水質に対する気候変動による影響の全国的評価」
- 10) 梅田信、落合雄太：土木学会地球環境シンポジウム（2012）

- 「気候変動による国内のダム湖水質への影響評価」
- 11) 桑原亮、梅田信：東北地域災害科学研究集会（2012）  
「国内のダム湖に流入するリン濃度と流域背景の関係評価」
- 12) R. KUWAHARA, M. UMEDA: 10th Annual Meeting of AOGS (2013)  
“Statistical Analysis and Future Projection on Inflowing River Water Quality to Reservoirs in Japan in Relation to Watershed Conditions”
- 13) 桑原亮、梅田信：土木学会地球環境シンポジウム（2013）  
「国内のダム湖における流入河川の水質と流域背景に関する統計的評価と将来展望」
- 14) M. UMEDA, Y. ISHIYAMA, Y. OCHIAI: Joint Aquatic Science Meeting, Portland (2014)  
“Influence of Climate Change on Phytoplankton Growth in Reservoirs in Japan”
- 15) R. KUWAHARA, M. UMEDA: IAHR-APD Congress (2014)  
“Statistical Analysis on Inflowing River Water Quality of Reservoirs in Japan in Relation to Watershed Conditions”
- 16) 桑原亮、梅田信：土木学会東北支部技術研究発表会（2015）  
「将来の環境変化が国内の貯水池水質に与える影響の予測と評価」
- 17) 桑原亮、梅田信：土木学会水工学講演会（2015）  
「流域背景に基づくダム湖流入河川の栄養塩濃度および負荷量の統計的解析」

### （3）出願特許

特に記載すべき事項はない。

### （4）「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 一般公開シンポジウム「平成24年度河川講習会」（建設コンサルタント境界東北支部主催、2012年12月18日、ハーネル仙台、参加者約100名）において、「気候変動による貯水池の水温および水質への影響」と題して講演（講演者 梅田信）。

### （5）マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

### （6）その他

特に記載すべき事項はない。

## 8. 引用文献

特に記載すべき事項はない。

## S-8-1 我が国全体への温暖化影響の信頼性の高い定量的評価に関する研究

### (3) 気候変動による水資源への影響評価と適応策に関する研究

#### ③ 小規模水供給システムへの影響評価

国立大学法人東京大学

大学院工学系研究科

滝沢 智、小熊 久美子

<研究協力者>

国立大学法人東京大学

大学院工学系研究科

酒井 宏治（平成22年度）

Wongrueng Aunnop（平成22年度）

渡辺 直子（平成22～23年度）

Lohwacharin Jenyuk（平成23～24年度）

Phetrak Athit（平成25～26年度）

平成22～26年度累計予算額：111,761千円

（うち、平成26年度予算額：21,140千円）

予算額は、間接経費を含む。

#### [要旨]

水道事業の気候変動への適応力を評価する複合業務指標(Combined Performance Indicator: CPI)を開発し、全国の水道事業体を類型化して全国地図に示した。その結果、気候変動への適応力には地域差があること、小規模水道は大規模施設に比べて概して適応力が低いこと等を視覚的に明らかにし、環境政策の立案や順位付けに有益な知見を提供した。また、特定地域を対象に水道ハザードマップを作成し、集中豪雨等による自然災害で被災する可能性の高い水道施設を抽出する方法論を提示した。さらに、気候変動に伴い消毒副生成生物の増加が懸念される島嶼部に注目し、その水質特性を踏まえた浄水処理技術として、イオン交換法や吸着処理と膜処理を組み合わせたハイブリッド処理が有効であることを示した。

#### [キーワード]

小規模水道、業務指標、ハザードマップ、島嶼部、浄水処理技術

#### 1. はじめに

小規模水道は、一般に、施設の維持管理や更新に要する費用と水道料金収入の不整合に起因する経営面の困難、専門技術者や専任職員を安定的に確保しがたいという人材面の困難など、様々な課題に直面しており、将来の気候変動に対して脆弱であると懸念される。特に、山間地域や離島などでは気候変動に伴う降雨パターンや原水水質の変化による水道事業への影響が大きいと予想され、小規模水道において今後どのような問題が顕在化し、あるいはどのような浄水技術が求められるのかを明らかにする社会的意義は大きい。

## 2. 研究開発目的

本研究では、気候変動が水道事業に及ぼす影響評価について、特に小規模水道と島嶼部水供給システムの観点から評価することを目指した。すなわち、気候変動への適応力にもとづき水道事業を類型化する手法を開発すること、当該手法を全国の水道事業体に適用して事業規模別に整理し小規模水道に特徴的な課題を抽出すること、さらに、島嶼部の原水水質特性を精査しそれを踏まえた浄水処理技術を開発することを本研究の目的とした。

## 3. 研究開発方法

### (1) 小規模水道への影響評価

水道事業を気候変動への適応力に基づいて類型化するため、2種類の異なる業務指標(Performance Indicator: PI)を組み合わせた複合業務指標(Combined Performance Indicator: CPI)を開発した。小規模水道を給水人口5万人未満の上水道および5千人未満の水道(簡易水道)と定義し、水道統計(厚生労働省健康局)及び全国簡易水道統計(全国簡易水道協議会)をもとに全国の小規模水道の統計データを網羅的に整理し、気候変動に脆弱な小規模事業体を類型化しマップ化した。

また、紀ノ川流域(和歌山県)、大淀川流域(鹿児島県、宮崎県)について、水道施設データと災害ハザードマップとの重ね合わせを行い、高ハザード地域に存在する水道施設を抽出した。豪雨及び渇水による過去7年間(2007~2013年度)の断水事例を整理し、特に断水期間および断水後の応急復旧期間を精査した。また、全国の高齢単身世帯人口の増減比率を平成22年度の国勢調査をもとにマップ化して、CPIを用いた気候変動適応力の全国マップと比較した。

気候変動に伴う豪雨による原水水質悪化(濁度上昇)の影響を受けうる現在及び将来の人口を、S-8 共通人口シナリオ(出生率中位-死亡率中位)と気候モデル(MIROC5.0、RCP2.6、RCP8.5)から推定した。気候変動に伴う濁度上昇の推定には、S-8-1(3)①水循環評価に関する研究のモデルを用いた。得られた影響人口分布を気候変動に対する水道事業体の適応力指標(大山ら、2014)と照らして考察した。

### (2) 島嶼部の水供給への影響評価

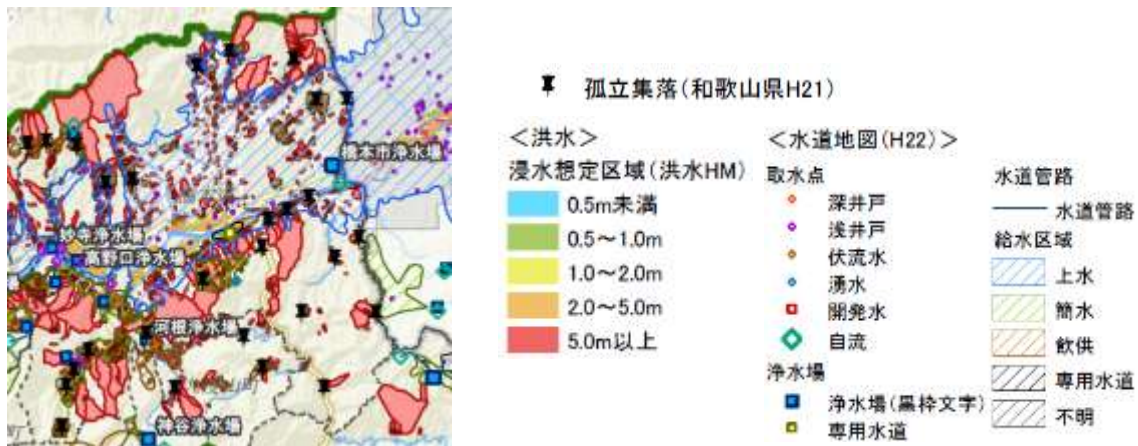
沖縄県企業局、沖縄県福祉保健部、那覇市上下水道局、沖縄県石垣市、竹富町、座間味村(阿嘉・慶留間水道施設を含む)の水道担当部局、鹿児島県奄美市水道課において、ヒアリングと現地調査を行った。沖縄本島の水供給に要する電力消費量原単位を水源別に算出し、将来の渇水リスクとエネルギー消費を考慮した施設運用方針を示した。那覇市の配水系統図を地理情報システム化し、貯水槽水道を直結式給水に変更することで削減可能なエネルギー量をシナリオ別に推算した。

また、気候変動に脆弱な離島の例として、小笠原諸島に着目した。現地でヒアリングと水源ダム湖・浄水施設の調査を行い、水供給の実態や過去の渇水による水道施設への影響について情報収集した。父島と母島の水道原水を採水し水質分析に供したほか、複数の浄水技術を適用して比較し、消毒副生成物生成量の観点から島嶼部特有の原水水質に適した浄水技術を検討した。

## 4. 結果及び考察

### (1) 小規模水道への影響評価

水道施設データと災害ハザードマップを重ね合わせた結果、紀ノ川流域では特に洪水時の土石流被害が懸念され、そのリスクが高い地域に複数の取水地点（特に井戸）や浄水施設が存在することが示された。これにより、災害に脆弱な水道施設を視覚的に把握するための方法論が示された。さらに、大規模災害時の孤立集落を水道ハザードマップと重ね合わせ、将来の気候変動で水供給が断絶するリスクが高い集落を視覚的に明らかにした（図1(3)③-1）。



過去7年間の豪雨による断水被害事例を整理した結果、断水の主な原因は豪雨による水源の濁度上昇であった。過去の事例では、断水期間が2～9日間に及び、断水後は、周辺事業者や自衛隊等による応急給水が実施されており、概ね断水後1日程度で応急給水が開始されていた。一方、濁水では給水制限が実施されたが、断水には至っておらず、気候変動に伴う断水リスクの上昇には濁水よりも豪雨による影響が大きいことが推察された。

全国の高齢単身世帯人口の増減比率を国勢調査データから整理した結果、北海道、本州の内陸部に加え、特に紀伊半島から四国、九州南部の西日本で高齢単身世帯比率が高いことが判明した。高齢単身世帯比率↑ 図1(3)③-1 水道ハザードマップと孤立集落の重ね合せ（和歌山県紀の川の例）

要な課題であることが明らかとなった。さらに自治体により高齢化率の上昇速度に大きな違いがあるため、これらの地域で、濁度上昇などによる水道供給の停止を未然に防ぐ対策を備えることの重要性が示された。突発的高濁度への技術的対策の一つとして、急速ろ過の導入が有効と考えられる。そこで、急速ろ過水量を指標の項目とした業務指標（CPI-201、浄水）の全国マップを作成し（図1(3)③-2）、高齢単身世帯比率と比較した。これにより、高齢単身世帯比率が高い紀伊半島、四国、九州南部の一部地域は適応力も低いことが視覚的に認知され、これら地域においてさらなる適応策の導入が喫緊の課題であることが明らかとなった。

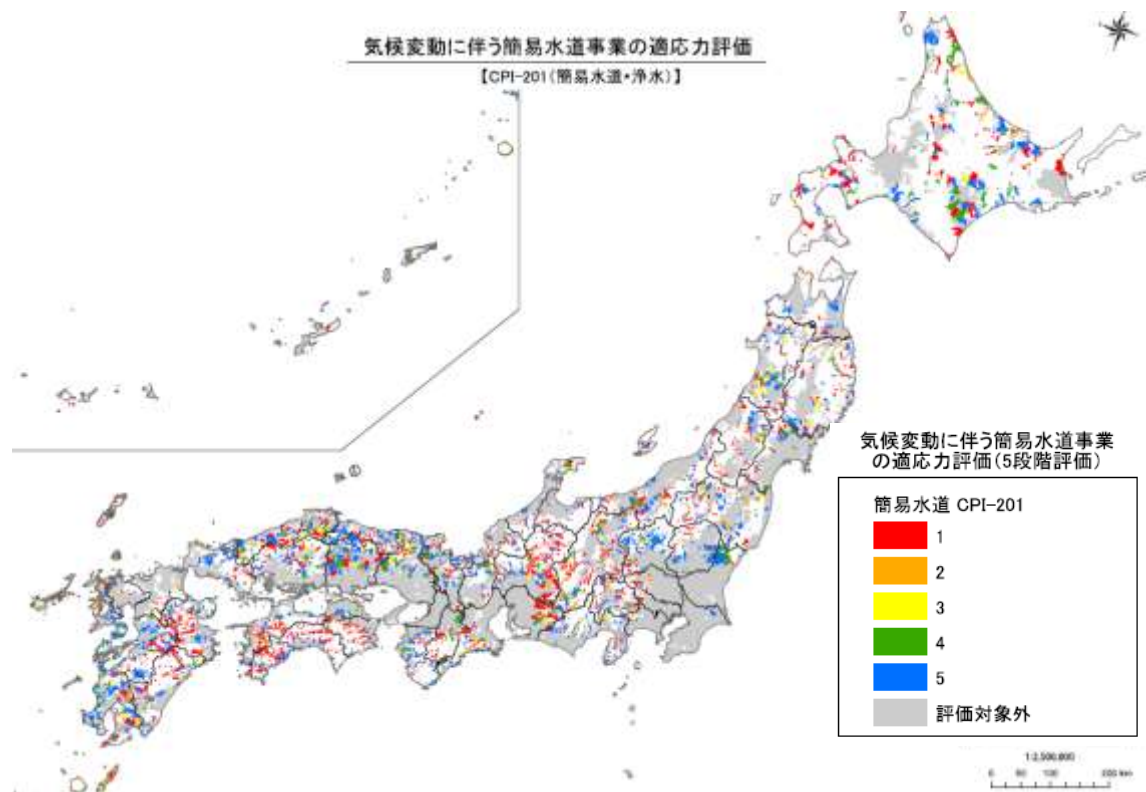


図 1(3)③-2 気候変動に伴う簡易水道事業の適応力評価結果の一例

気候変動に伴う濁度上昇の影響を受けると推定される全国の人口を推計した結果、給水人口全人口に占める影響人口の比率は、給水人口 5 万人以上および 5 万人未満の上水道では概ね同程度であるものの、簡易水道では上水道に比べて 2010 年、2050 年、2100 年のすべてにおいて影響人口比率が高かった。また、影響を受ける人口の内訳を気候変動適応力指標別に整理すると、人口 5 万人以上の上水道事業では適応力指標 5（極めて適応力が高い）および 4（適応力が高い）に該当する浄水場が多く、浄水処理による対応がある程度可能と推定された。しかし、水道の規模が小さくなるにしたがって適応力指標が小さい（適応力が低い）浄水場の比率が増大し、特に簡易水道において適応力指標 1（極めて適応力が低い）の事業体の比率が著しく高く、全ての推計年において 75%程度となった。すなわち、気候変動に伴う水道原水濁度が上昇した場合、小規模な水道、特に簡易水道では処理強化などの対応をとり難く、給水制限や給水停止など社会的影響の大きい事態に陥るリスクが高いことが示唆された。

## （２）島嶼部の水供給への影響評価

沖縄県でのヒアリングと現地調査の結果、沖縄本島では水質の異なる複数の水源（ダム、河川水、地下水、海水淡水化）を柔軟に組み合わせて利用することで供給水の質・量を確保していること、離島では技術的課題があることなどを明らかにした。また、奄美市の調査では、緊急時対応のための財源確保の重要性、古い配水設備などバックアップ施設の有用性などが示された。

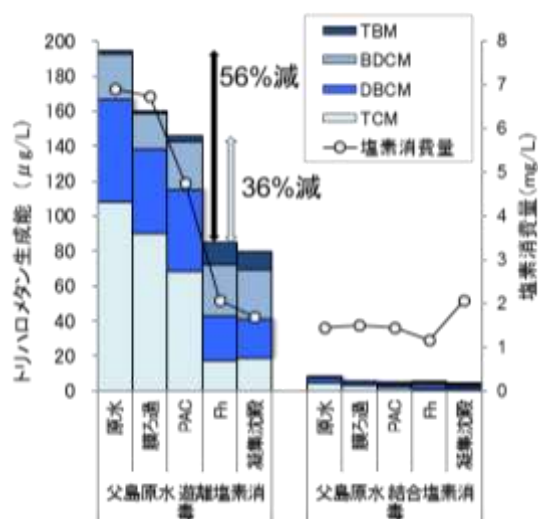
降雨によるダム貯水率の変化を表す概念モデルを開発し、海水淡水化施設の運転シナリオ別にダム貯水率の変化をシミュレートした結果、海水淡水化施設の稼働により少雨だった 2009 年に



70日間の節水努力を免れたものと推算された。また、海水淡水化施設の稼働により、ダム貯水率の年間変動幅を低減できることが示された。一方、海水淡水化施設は他の水源と比較して4.5倍から14.7倍の電力を消費するため、合理的に稼働するための運転支援プログラムの必要性が明らかになった。

小笠原諸島の父島及び母島で水道原水を採水し分析した結果、亜熱帯気候で繁茂する植物に由来するフミン質等の有機物を多く含み、消毒副生成物を生成しやすい原水であることが確認された。また、海水に由来する臭化物イオンの濃度も特徴的に高く、塩素消毒により生成する副生成物のうち特に毒性の強い臭素系の消毒副生成物が多いことが明らかとなった。そのような原水に適した浄水方法を提案するため、遊離塩素処理及び結合塩素処理による消毒副生成物生成能試験に供した。測定対象は、トリハロメタン（THMs）、ハロ酢酸（HAAs）、ニトロソジメチルアミン（NDMA）とした。その結果、THMs、HAAsは総じて遊離塩素処理の生成能が高く、遊離塩素処理の総トリハロメタン、クロロホルム、ジクロロブロモメタン、ジクロロ酢酸が基準値を超過したが、結合塩素処理ではすべての項目で水道水質基準を下回った。一方、NDMAは結合塩素処理の場合のみ生成したが、生成量は水道水質基準の要検討項目目標値（100ng/L）を大きく下回った。

父島の原水試料に異なる浄水処理を適用し、消毒副生成物生成能の抑制効果を実験的に検討した。例として、トリハロメタン生成能の変化を図1(3)③-3に示す。



（膜ろ過：精密(MF)膜ろ過処理、PAC：粉末活性炭処理後にMF膜ろ過、Fh：フェリハイドライト処理後にMF膜ろ過）

図1(3)③-3 各浄水処理によるトリハロメタン生成能の変化と内訳

図1(3)③-3より、MF膜ろ過のみによる処理では、原水と比べて全体的にトリハロメタン生成能は減少するものの、効果は限定的であった。PAC-MF膜ろ過処理では、膜ろ過単独処理よりもやや除去率が向上した。一方、Fh-MF膜ろ過処理では、トリハロメタン生成能除去率は大幅に向上したものの、臭素系消毒副生成物が全体に占める割合は増加した。このように、島嶼部の水道原水に特徴的な課題を理解し、島嶼部に有効な浄水技術開発に資する知見を得た。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

本研究の科学的意義は、水道統計と災害時ハザードマップの重ね合わせ、高齢単身世帯比率と水道業務指標評価の重ね合わせなど、従来それぞれに認識されてきたデータソースを統合的に理解し、個別のデータ参照では得られなかった知見を明らかにした。さらに、結果をマップ化することで視覚的な課題認識が可能となったほか、その方法論を示した。

海水淡水化施設の稼働によるベネフィット（節水行動の回避）とコスト（電力消費量）を定量的に明らかにし、これまで経験的に稼働・運用されていた海水淡水化施設に対し合理的で持続可能性の高い運転方法を提案するソフトウェアなど支援ツールの開発可能性を示した。

小笠原諸島の水道原水中の有機物組成を精査し、島嶼地域に特徴的な性質を理解した。また、消毒副生成物の観点から、島嶼部に適した浄水処理方法の開発に資する基礎的知見を得た。

### (2) 環境政策への貢献

#### <行政が既に活用した成果>

東京都水道局が、温暖化対策を検討するにあたり、本研究の成果を引用し、ヒアリングなどに協力した。

#### <行政が活用することが見込まれる成果>

災害対策や水道施設運営に関する政策決定に有益な情報をマップ等で視覚化し、政策担当者や市民などに理解されやすい形式で提供した。特に、自然災害で孤立し水供給が断絶するリスクの高い集落を示し、政策の優先順位づけに有益な情報を提供した。

## 6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### <論文（査読あり）>

- 1) H. NISHIKOORI, M. MURAKAMI, H. SAKAI, K. OGUMA, H. TAKADA and S. TAKIZAWA: Chemosphere, 84(8), 1125-1132 (2011)

“Estimation of contribution from non-point sources to perfluorinated surfactants in a river by using boron as a wastewater tracer”

- 2) 吉川 泰代、矢部 博康、小池 亮、森本 達男、小熊 久美子、荒巻 俊也、滝沢 智：土木学会論文集G、Vol.68, No.7, III\_147-III\_156 (2012)

「水道ハザードマップを用いた自然災害による水道事業への影響評価」

- 3) T. ISHIDA, S. TAKIZAWA, N. WATANABE, M. MURAKAMI, H. SAKAI and K. OGUMA: Desalination and Water Treatment, 51(1-3), 19-25 (2012)

DOI:10.1080/19443994.2012.714895

“Optimum operation of desalination plant to minimize power consumption and water

shortage risks in Okinawa, Japan”

- 4) M. KUROIWA, T. MASUDA, T. OMURA, A. WONGRUENG, K. OGUMA, H. SAKAI, M. MURAKAMI and S. TAKIZAWA: Desalination and Water Treatment, 51(4-6), 950-957 (2012)  
DOI:10.1080/19443994.2012.715072  
“Membrane fouling in seawater desalination processes caused by harmful dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides*”
- 5) A. PHETRAK, J. LOHWACHARIN, N. WATANABE, M. MURAKAMI, H. SAKAI, K. OGUMA and S. TAKIZAWA: Water Science and Technology, 12(5), 630-036, (2012)  
“Competitive removal of dissolved organic matter (DOM) and inorganic anions by anion exchange resins (AERs)”
- 6) Y. YANG, S. TAKIZAWA, H. SAKAI, M. MURAKAMI and N. WATANABE: Water Science and Technology, 66(6), 1348-1353 (2012)  
“Removal of organic matter and phosphate using ferrihydrite for reduction of microbial regrowth potential,”
- 7) A. PHETRAK, J. LOHWACHARIN, H. SAKAI, M. MURAKAMI, K. OGUMA and S. TAKIZAWA: Journal of Environmental Sciences, Vol.26(6) (2014)  
“Simultaneous Removal of Dissolved Organic Matter and Bromide from Drinking Water Source by Anion Exchange Resins for Controlling Disinfection By-Products”
- 8) 大山秀格、川本圭彦、小池亮、森本達男、小熊久美子、荒巻俊也、滝沢智：土木学会論文集G、70(7), III\_131-III\_140 (2014)  
「水道経営指標群を用いた気候変動に対する適応力評価手法の検討」
- 9) Y. YANG, J. LOHWACHARIN and S. TAKIZAWA: Water Research, 15(65), 177-185, DOI: 10.1016/j.watres.2014.07.030 (2014)  
“Hybrid ferrihydrite-MF/UF membrane filtration for the simultaneous removal of dissolved organic matter and phosphate”
- 10) J. LOHWACHARIN, Y. YANG, N. WATANABE, A. PHETRAK and S. TAKIZAWA: Water Science & Technology: Water Supply, 14(1), 165-172, IWA Publishing (2014)  
DOI:10.2166/ws.2013.185  
“Removal of DOM and AOC in a full-scale advanced water treatment plant: effects of operational periods of BAC filters”

#### <査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

#### <その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない。

#### (2) 口頭発表（学会等）

- 1) 渡辺直子、L. JENYUK、P. ATHIT、酒井宏治、村上道夫、滝沢智：第45回水環境学会年会（2010）  
「高度浄水処理プロセスにおける溶存有機物の変化：励起蛍光マトリックス及びサイズ排除クロマトグラフィーによる測定」
- 2) 渡辺直子、矢部博康、小池亮、森本達男、荒巻俊也、滝沢智：第19回地球環境シンポジウム（2011）

「業務指標を用いた気候変動に対する小規模水道事業者の脆弱性評価」

- 3) T. ISHIDA, S. TAKIZAWA, N. WATANABE, M. MURAKAMI, H. SAKAI, K. OGUMA: 淡水化国際会議 (2012)  
 “Optimum operation of desalination plants to minimize power consumption and water shortage risks in Okinawa, Japan”
- 4) M. KUROIWA, T. MASUDA, T. OMURA, A. WONGRUENG, K. OGUMA, H. SAKAI, M. MURAKAMI, S. TAKIZAWA: 淡水化国際会議 (2012)  
 “Membrane fouling in seawater desalination processes caused by harmful dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides*”
- 5) A. PHETRAK, J. LOHWACHARIN, H. SAKAI, M. MURAKAMI, K. OGUMA, S. TAKIZAWA: The 5th IWA ASPIRE (2013)  
 “Simultaneous removal of dissolved organic matter and bromide from drinking water source by anion exchange resins for controlling disinfection by-products”
- 6) A. PHETRAK: 5th IWA Specialist Conference on Natural Organic Matter Research (2013)  
 “Removal of Disinfection by - Products Precursors from Low - SUVA Water by Anion Exchange Resins,”
- 7) 大山秀格、矢部博康、小池亮、森本達男、小熊久美子、荒巻俊也、滝沢智：水道研究発表会 (2013)  
 「水道ハザードマップを用いた孤立集落の災害対応力の分析」

### (3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

### (4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 将来の安全・安心な社会をめざして、2011年10月12日、日本科学未来館、パネルディスカッション、滝沢智

### (5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 日本水道新聞 2011. 8. 29 「奄美大島水害からの教訓」 滝沢智
- 2) 水道産業新聞 2012. 10. 11 「島嶼部の小規模水道の持続に向けた方向性を探る」 滝沢智

### (6) その他

特に記載すべき事項はない。

## 8. 引用文献

特に記載すべき事項はない。

**S-8-1 我が国全体への温暖化影響の信頼性の高い定量的評価に関する研究****(3) 気候変動による水資源への影響評価と適応策に関する研究****④ 大都市における水道への影響評価に関する研究**

国立保健医療科学院

秋葉 道宏、小坂 浩司

&lt;研究協力者&gt;

国立保健医療科学院

岸田 直裕

下ヶ橋 雅樹（平成24～26年度）

国立大学法人岐阜大学

工学部

山田 俊郎

平成22～26年度累計予算額：32,627千円

（うち、平成26年度予算額：5,839千円）

予算額は、間接経費を含む。

**[要旨]**

気候変動の大都市水道への影響評価として、以下の研究を実施した。工場用水の減断水による被害額の算定、藻類障害に対する大都市水道システムの適応性評価、ならびに生物障害事例とその対策実態を全国規模で調査した。また、全国的な視点で浄水過程での凝集剤注入率の推算方法を検討した。さらに釜房ダム流域の水文水質モデルを作成し、濁度増加を通じた降水強度増加の浄水コストに与える影響の評価法を確立した。加えて、利根川の利根大堰において、濁度および微生物汚染指標を調査し、河川流量・雨量との相関を調べた。

**[キーワード]**

水道、減断水、生物障害、高濁度化、被害額

**1. はじめに**

気候変動に伴う異常気象は、様々な形で水環境に依存する社会・産業活動に影響を与える。水道もそのうちのひとつであり、水源地流域における降水量減少に伴う渇水や原水水質の悪化、あるいは集中的な豪雨による濁度の上昇やそれに伴う浄水発生土量の増加等が、その影響の顕在化した例として挙げられる。また、結果として生じる具体的な被害として、豪雨に伴う水害による水道施設被害、原水の高濁度化を原因とする断水や、少雨による取水制限、気候の変化もその一因と考えられる、藻類の異常増殖に伴う異臭味被害等が各地で報告されている。これらの影響は水道システムに基盤をおく都市での生活や産業活動の妨げとなり、その影響を理解し適切な対策を講じることが、気候変動の影響下での都市の持続性を高めるうえで重要となる。そこで本研究では、減断水や生物障害、高濁度化といった視点から、大都市の水道システムへの気候変動の影響を評価することとした。

## 2. 研究開発目的

本研究は、気候変動がもたらす水道原水の質や量の変化が大都市の水道システムに与える影響やその適応性を明らかとし、都市での安全・安心な水の安定した供給に資する政策および適応策の立案に資する成果を出すことを目的とした。具体的には、洪水や渇水に伴う大都市の水道施設への減断水影響リスクの定量化、気候変動の進捗に従ってその発生頻度の増加が懸念される生物障害の実態把握と水道システムの適応性評価、集水域の気候変化に伴う水道原水の濁度ならびに薬品使用量の予測方法の確立、雨量やその結果としての河川流量と微生物汚染のリスクの関連性評価を行うことを目標とした。

## 3. 研究開発方法

温暖化による大都市の水道被害規模を推定するため、人口1万人以上の1,236都市を対象に、厚生労働省「水道事業の費用対効果分析マニュアル（改訂版、平成23年）」の減断水被害の算定方法に準じて水害被害規模を求めた。被害の推定において、生活用水、工場用水、営業用水の減断水による被害に分けて算出した。

藻類障害に対する大都市水道システムの適応性について、大臣認可の水道事業者（給水人口5万人以上、約440事業者）を対象に、（1）藻類障害が起こる可能性、（2）あとどれだけ水質が悪化しても処理で対応できるかの観点から、それぞれスコア化し、それに基づいて脆弱性評価を行った。スコア化には業務指標（PI）を用い、そのデータとして、平成20年度版の水道統計（施設業務編、水質編）、および（公財）水道技術研究センターの解析結果を利用した。

将来の濁度上昇に伴う浄水薬品の使用量増加を予測するための基礎データとして、全国の水道事業者から水道原水の濁度と浄水薬品使用ならびに関連情報を集め、凝集剤注入率の推算方法を検討した。

国内の大都市に位置する24水道事業者の全ての浄水場（全142浄水場）における過去5年間（平成17～21年度）の生物障害事例とその対策実態についてのアンケート調査を行った。さらに、通常処理（急速ろ過方式）を行っている国内の比較的大規模な3浄水場を対象に、過去5年間における原水水質および薬品注入率、浄水量、浄水場と排水処理にかかる消費電力量を調査し、生物障害が浄水処理システムに及ぼす金銭面の負荷を明らかとした。

水道水源流域における豪雨による高濁度化の浄水処理システム影響評価に関して、仙台市水道局の水源のひとつである釜房ダム流域を対象として、降雨とダム湖内濁度の関係を準分布型の水文水質モデルを用いて定量化し、濁度増加を通じた、降水強度増加の浄水コストに与える影響の評価法を確立した。

利根川の利根大堰右岸において、高頻度の採水・水質検査を行い、濁度および微生物汚染指標として大腸菌、大腸菌群、水系感染性ウイルスとしてノロウイルス、腸管系アデノウイルス濃度の変動実態を調査し、河川流量・雨量との相関を調べた。

## 4. 結果及び考察

断水による製造業（工場生産）への影響額の算定結果を図1(3)④-1に示す。関東、東海、関西の沿岸部の工業地帯の他に、北関東地方や中部地方の都市において断水による工業生産への影響が比較的大きいことがわかった。断水影響額全体に占める割合が大きい業種は都市規模で異なり、

5万人以上の都市では輸送機械器具製造業、鉄鋼業等が、5万人未満1万人以上の都市では情報通信機械器具製造業や電子部品・デバイス・電子回路製造業などの精密機械を製造する業種であることが分かった。

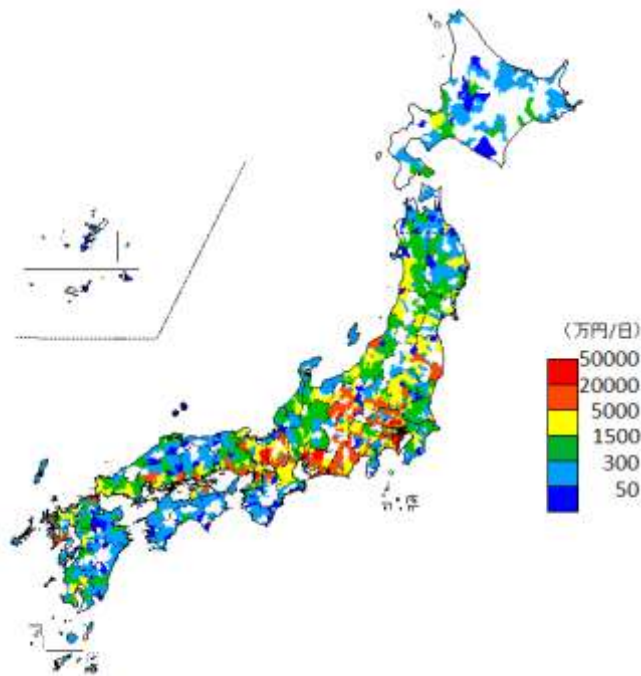


図1(3)④-1 都市（人口1万人以上）の工場生産に対する1日当たりの給水制限率100%での被害額

藻類障害に対する大都市水道システムの適応性について、解析結果をGIS上で図示化した結果を図1(3)④-2に示す。判定結果がCの事業者が最も多く、約30%が該当した。DまたはEという判定結果であった事業者は全体の約40%であった。地域別に見ると、中国・四国地方、九州・沖縄地方でのD及びEの割合が高かったが（50～60%）、北海道・東北地方も含め他地域でも30～40%程度の水道事業者は、藻類障害への適応性が小さいと考えられることが示された。

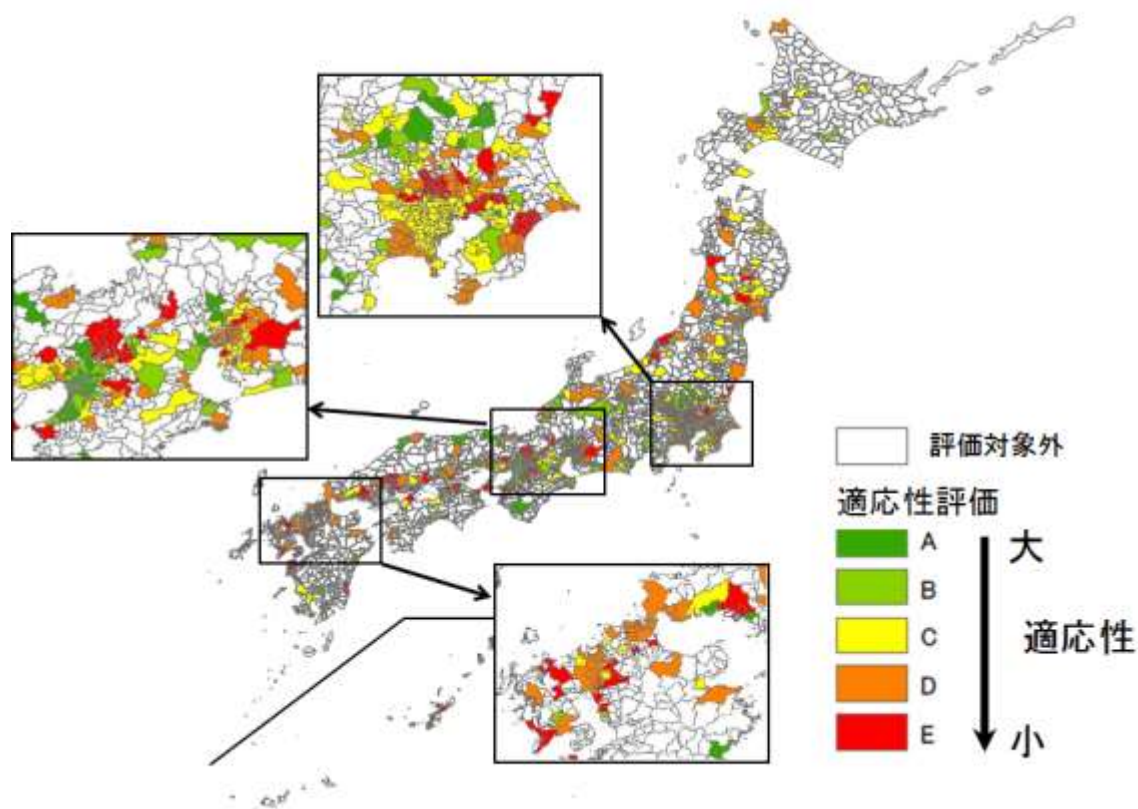


図1(3)④-2 藻類障害への適用性から見た水道事業者の評価

生物障害事例とその対策実態について、調査対象とした24事業者のうち、平成17～21年度の5年間に何れかの生物障害が発生したと回答した事業者は19事業者（79%）であり、また浄水場ベースで見ても、142浄水場のうち61浄水場（43%）で生物障害が発生しており、全国広範囲の浄水場が生物障害に悩まされていることが明らかとなった。生物種別に見ると、藍藻類による被害が全体の41%を占め、最も多かった。藍藻類は増殖に適する水温が他の生物種よりも高いことが知られており、今後の気候変動に伴う水温上昇は生物障害による被害を拡大させる可能性が高い。また、障害の種類別に見ると、異臭味障害が全体の57%と高い割合を占めていた。異臭味障害に対する対策としては、67%が粉末活性炭処理を行っており、多くの浄水場では、導入が容易ではあるが処理コストの増大を招く応急的な対策に頼らざるを得ない状況にあることが明らかとなった。また、生物障害発生時には、浄水処理コストが著しく増大することが明らかとなった。生物障害が発生していない時と比べ、発生時には、処理コストが1.7～2.9倍に増加していた。費用の内訳を見ると、粉末活性炭の投入費用の割合が最も大きかった。

また、濁度変化に伴う全国的な凝集剤注入率変化の予測手法を確立するため、原水濁度と凝集剤注入率の関係について、全国の表流水を水源とするいくつかの浄水場から得られた濁度と凝集剤ならびにその他関連項目に関する情報をもとに俯瞰的な回帰式を作成した。その結果、濁度測定方式や平均注入率等の違いによって異なる回帰曲線が得られた。例えば濁度測定は散乱光方式、凝集剤にはポリ塩化アルミニウム（PAC）を使用し、pH調整剤を使用している、年間PAC注入率が50[mg/L]未満であった12浄水場（期間：2011～13年（8浄水場）、2012～13年（1浄水場）、2013



年（浄水場）からは、月平均PAC注入率[ $\text{mg/L}$ ] $= 18.482 \times (\text{月平均濁度}[\text{度}])^{0.2558}$ といった関係式が得られた（観測数356、 $R^2=0.4624$ ）。一方でより精度の高い注入率予測式を得るため、個別の浄水場に関して、アルカリ度や水温による凝集剤注入率の変化を鑑み、浄水場原水取水口の集水域における雨量及び気温を入力として、河川流出モデルを援用し、原水濁度ならびに凝集剤注入率を推算する方法を提案した。

水道水源流域における豪雨による高濁度化の浄水処理システム影響評価に関して、レーダー・アメダス解析雨量によって見積もられる釜房ダムの流域内降雨を入力として、ダム湖への流入河川流入量及びダム湖内濁度を予測する準分布型水文水質モデルを、米国農務省及びテキサスA&M大学アグリライフ研究センターが開発したSWAT(Soil and Water Assessment Tool)上に構築した。モデルのパラメータは流入河川流量ならびに濁度の実測値により補正・検証した。ダム湖への流入河川流量ならびにダム湖内濁度に関する予測結果を図1(3)④-3及び1(3)④-4にそれぞれ示す。

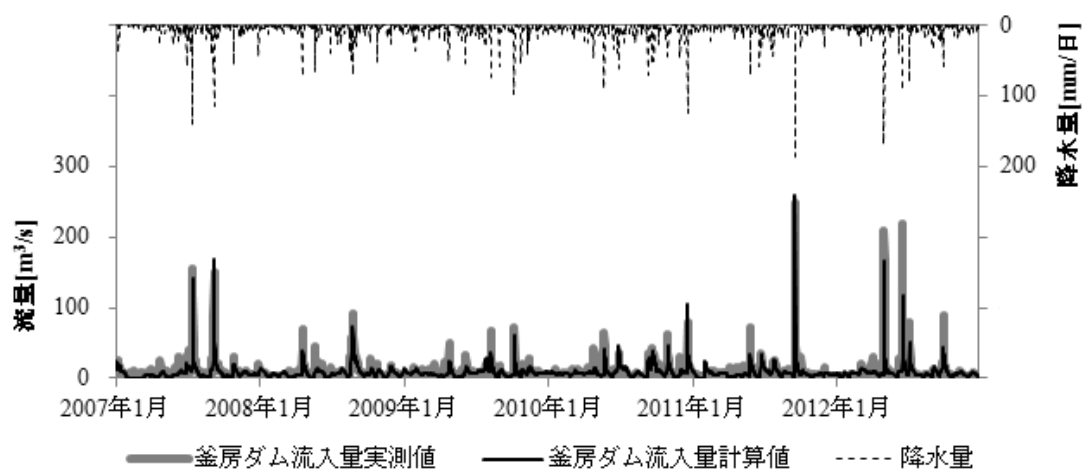


図1(3)④-3 釜房ダム流域の降水量（実測値）と流入河川流量（実測値と予測値）

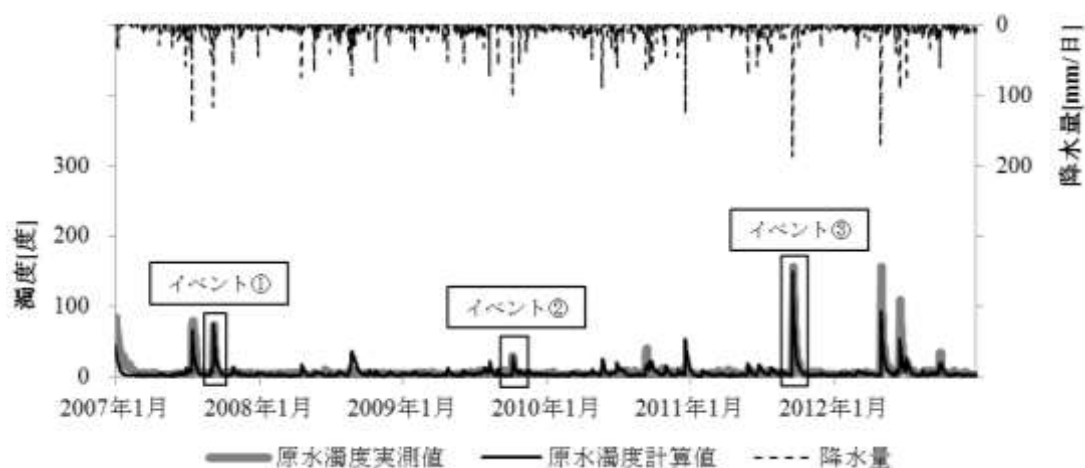


図1(3)④-4 釜房ダム流域の降水量（実測値）と濁度（実測値と予測値）

このモデルを用いて、将来の降雨強度が変化した場合の濁度ならびに浄水処理コストの変化を予測した。具体的には前述の予測性の高かったイベント①～③（図1(3)④-3参照）の降水量が変化した場合の濁度変化と、それに伴う浄水処理コストの変化をシミュレーションした。浄水処理コス

トにおいては、薬品（ポリ塩化アルミニウム（PAC）と石灰）購入費及び浄水発生土の運搬と処分にかかる費用を取り上げた。結果を図1(3)④-5に示す。この結果より、同流域において降水量が1.3及び1.6倍と増加した場合のPAC使用量、石灰使用量及び浄水発生土量の増加について、例えば2011年9月にみられた豪雨（イベント③）の降水量が1.3倍になった場合には、約2,960千円（これらの年間コスト総額の約4.7%）増加するものと推算された。

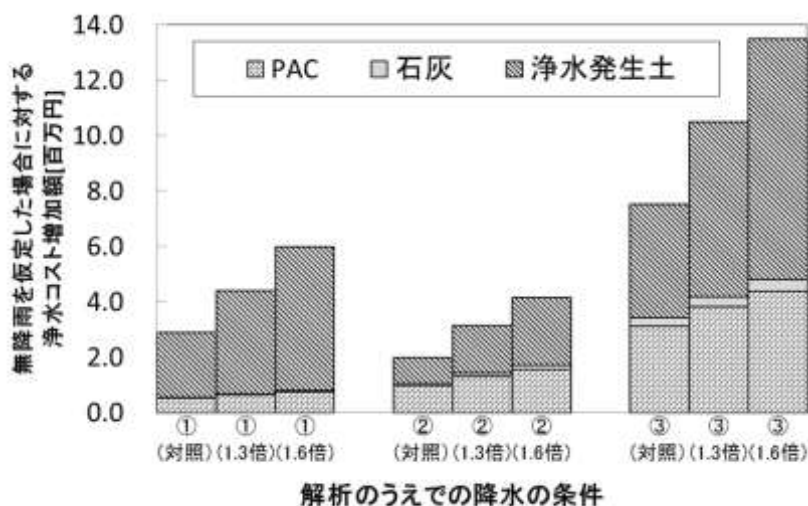


図1(3)④-5 豪雨イベントの降水量変化（カッコ中の数値にて示す）に伴う浄水コストの変化予測

利根大堰での実態調査について、利根大堰右岸における河川流量、雨量、濁度との関連性について見たところ、採水地点での河川流量は、その上流域全体の雨量をある程度反映していると考えられ、河川水の濁度、さらには指標微生物濃度とも有意な正の相関関係が認められた( $p < 0.01$ )。このことから、気候変動に伴い雨量が増加する流域に存在する浄水場では、原水の濁度が上昇し、さらに微生物汚染のリスクが高まると推測された。一方、水系感染性ウイルスに関しては、河川流量や雨量との相関性は低く、冬季に汚染濃度が高くなった。これらの水系感染性ウイルスの排出は下水道等を通して主にヒトから排出されていると推測され、河川水中の汚染濃度は上流域の急性胃腸炎患者数と強く相関することが過去の筆者らの調査で明らかとなっており、このような季節性の変動要因の方が、降雨等の要因よりも汚染濃度に及ぼす影響が大きいと考えられた。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

気候変動に伴いその発生の増加が懸念される断水による影響について、1,200以上の都市を対象に生活用、都市活動用、工場生産用についてそれぞれ求め、全国規模で断水被害規模の地域的な差異や特徴を俯瞰することができた。また、全国の水道事業者から得た情報をもとに、濁度や集水域の気候条件から凝集剤注入率を推算する方法を提案した。さらに、藻類障害から見た水道システムの適応性について、全国規模で評価を行い、図示化することができた。加えて、生物障害事例とその対策実態調査により、生物障害が浄水システムに与える影響の現状が明らかとなった。特に、生物障害の発生が浄水処理コストの増大に及ぼす具体的な影響を明らかにできた。

個別の事例としては、釜房ダム流域の準分布型水文水質モデル解析により、将来の降水強度の

変化に伴う濁度変化やそれに伴う各種浄水コストの変化を予測することができた。また同モデルは土地利用も考慮しており、土地利用変化を伴う流域内気候変動適応策の効果予測に活用することも可能である。また、利根大堰での調査から、水源河川における濁度や微生物濃度の変動と降雨との関係性を明らかとすることができた。

## (2) 環境政策への貢献

### <行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

### <行政が活用することが見込まれる成果>

平成29年版水道維持管理指針の作成に対して科学的知見が提示できる。

水道水源流域における豪雨による高濁度化の浄水処理システム影響評価として提案した釜房ダム湖の解析手法は、気候変動を踏まえた長期的な視点に立った水道計画の立案の一助になり得る。

水道事業の適応力や予想される被害額を一定程度の精度をもって示すことにより、将来的に国および地方自治体レベルでの適応策を検討するうえで有用な情報を提供した。

## 6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### <論文(査読あり)>

1) N. KISHIDA, Y. KONNO, K. NEMOTO, T. AMITANI, A. MAKI, N. FUJIMOTO and M. AKIBA: Water Science and Technology: Water Supply, 13, 5, 1228-1235 (2013)

“Recent trends in microorganism-related off-flavor problems in drinking water treatment systems in Japan”

2) 小保内啓太、下ヶ橋雅樹、秋葉道宏：水道協会雑誌（印刷中、2015年5月号掲載予定）

「水文水質モデルを用いた釜房ダム流域における豪雨による高濁度化の浄水処理システム影響評価」

#### <査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

#### <その他誌上発表(査読なし)>

特に記載すべき事項はない。

### (2) 口頭発表(学会等)

1) N. KISHIDA, Y. KONNO, M. AKIBA: The 9th IWA Symposium on Off-Flavours in the Aquatic Environment (2011)

“Recent trends in off-flavour problems in drinking water treatment systems in Japan”

- 2) 切川徹哉、石橋健二、小坂浩司、山田俊郎、秋葉道宏：第63回全国水道研究発表会（2012）  
「業務指標を用いた水道システムの脆弱性評価」
- 3) M. AKIBA, M. SAGEHASHI, K. KOSAKA, N. KISHIDA, T. YAMADA: The 34th International Symposium on Environmental Issues (2013)  
“Research on assessment of climate change impacts on water supply systems and adaptation measures”
- 4) 原本英司、岸田直裕、森田久男、黒川恵未、北島正章、浅見真理、秋葉道宏：第15回日本水環境学会シンポジウム（2012）  
「水道水源河川における健康関連微生物の濃度変動調査」
- 5) 下ヶ橋雅樹、山田俊郎、中村玲奈、小坂浩司、秋葉道宏：第49回環境工学研究フォーラム（2012）  
「降水が水道原水の懸濁物質およびその浄水処理時の凝集剤注入量に与える影響」
- 6) 下ヶ橋雅樹、北村淳、小島禎行、岸田直裕、小坂浩司、秋葉道宏：第47回日本水環境学会年会（2013）  
「異常気象が水道原水の濁質に与える影響に関する検討」
- 7) 秋葉道宏、下ヶ橋雅樹、小坂浩司、岸田直裕：第26回環境工学連合講演会（2013）  
「水道における気候変動への緩和策と適応策」
- 8) 下ヶ橋雅樹、小保内啓太、秋葉道宏：第16回日本水環境学会シンポジウム（2013）  
「釜房ダム集水域における降雨が水道原水の濁度に与える影響の解析」
- 9) 下ヶ橋雅樹、小保内啓太、室井康宏、森亮、吉田康宏、秋葉道宏：第48回日本水環境学会年会（2014）  
「集水域での豪雨による水道原水高濁度化と凝集プロセスに与える影響の解析」
- 10) M. SAGEHASHI, I. KANDA, K. SAITO, S. MOMIYAMA, M. AKIBA: The 23rd Japan-Korea Joint Symposium on Water Environment (2014)  
“A Study on the Aging / Depopulation and Water Supply Systems in Japan”
- 11) 小保内啓太、下ヶ橋雅樹、秋葉道宏：第65回全国水道研究発表会（2014）  
「釜房ダム流域における豪雨に伴う水道原水高濁度化が浄水コストに与える影響の評価」
- 12) 松本悠、岸田直裕、古屋崇志、原本英司、沢田牧子、原田裕之、荒井勉、秋葉道宏：第65回全国水道研究発表会（2014）  
「水道水源における病原微生物濃度の変動実態調査」

### (3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

### (4) 「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない。

### (5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

特に記載すべき事項はない。

## S-8-1 我が国全体への温暖化影響の信頼性の高い定量的評価に関する研究

### (3) 気候変動による水資源への影響評価と適応策に関する研究

#### ⑤ 影響評価のためのトップダウン型モデルの開発

学校法人東洋大学

国際地域学部国際地域学科

荒巻 俊也

平成22～26年度累計予算額：6,902千円

(うち、平成26年度予算額：501千円)

予算額は、間接経費を含む。

#### [要旨]

本研究では気候変動の水道供給への影響に焦点をあててトップダウン型の評価モデルを開発し、社会の変化も考慮した全国レベルで影響評価を行うとともに適応策の評価を実施した。まず水道事業者ごとの業務指標（PI）を組み合わせた適応力指標を作成した。さらに、水源河川における土砂流出量や水源ダムにおける藻類の発生状況の予測などの気候変動の影響と、将来の人口動態といった社会の変化から、温暖化による影響を受けやすい水源を利用している事業者やその人口を全国レベルで抽出し、これらの被害と適応策について定量的に評価した。例えば、藻類の発生増加による浄水処理の負担増は、ダム湖内の曝気施設の設置の費用より大きいケースが多いことが試算された。

#### [キーワード]

水道事業、脆弱性、適応力、全国評価

### 1. はじめに

気候変動（温暖化）は、自然や社会に様々な影響をもたらすが、水資源の量・分布、質に対しては直接的な影響をもたらすため、水を利用する我々人間社会に対しても大きな影響がある。一方で、我が国の水資源・水利用は、高度成長期の建設・拡大期から政策的な議論も含めて大きな転換期に来ているため、社会的な変動と気候変動の両方を考慮した対応が求められている。

気候変動の水資源への影響と適応策を考えるうえでは、その予測手法を高精度化し、より信頼性の高い評価を行う必要がある。その一方で、日本においても全国レベルで十分な検討がなされてきたとは言えない状況である。

### 2. 研究開発目的

上記の理由から、全国レベルで入手可能なデータに基づいて一律の基準のもとに影響や脆弱性、適応策の効果を評価する必要がある。そこで、本研究では水資源の利用側として、国民の生活の観点から特に重要である水道供給への影響に焦点をあててトップダウン型の評価モデルを開発し、社会の変化も考慮した全国レベルで影響評価を行うとともに、適応策の評価を実施することを目的とする。

### 3. 研究開発方法

トップダウン型モデルを開発するにあたって、関連研究者との議論をもとに図1(3)⑤-1のように気候変動による水資源への影響図を作成した。この中で、本課題における検討の対象範囲を右上の家庭・営業用水、工業用水の範囲に定めた。さらに、この対象範囲の中で、気候変動による河川における低水流量、土砂量の変化、貯水池における水質変化による断水や浄水コストの影響等について、評価方法を検討していくこととした。

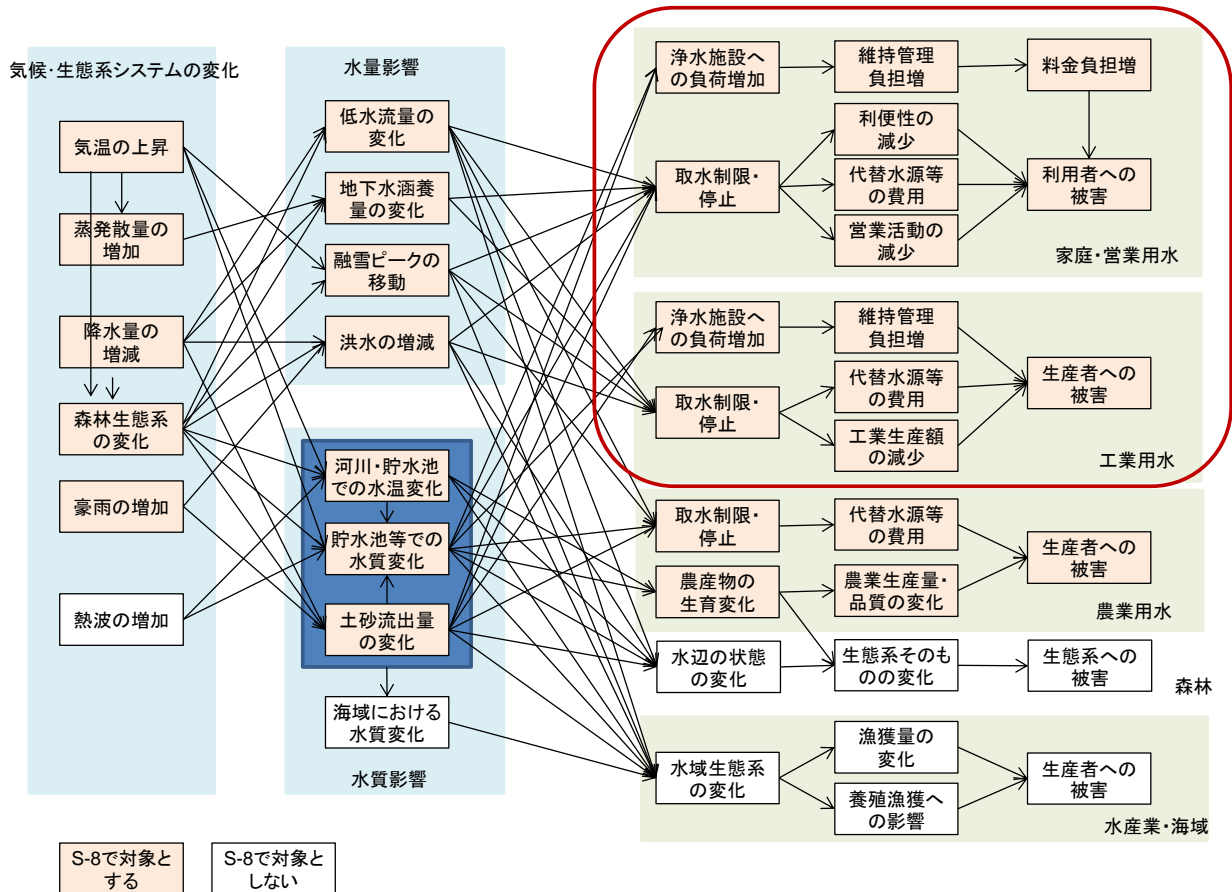


図1(3)⑤-1 水資源への影響図

研究のフローを図1(3)⑤-2に示す。まず水道事業者ごとの業務指標（PI）を収集し、水源利用率や余裕率、自己保有水源率など気候変動や渇水被害と関連性が高い指標を抽出し、GIS上に整理した。さらに、これらの指標を組み合わせた適応力指標を作成した。また、自治体ごとの統計から、高齢人口率や高齢独居世帯率、高齢夫婦世帯率など、渇水被害の脆弱性の評価に関わる指標を抽出し、同様にGIS上に整理した。

また、S-8-1(3)①やS-8-1(3)②のテーマを担当する共同研究者から提供された水源河川における土砂流出量や水源ダムにおける藻類の発生状況の予測、および将来の各都道府県での人口の動態をもとに、温暖化による影響を受けやすい水源を利用している事業者やその人口などについて全国レベルで抽出を行った。さらに、温暖化影響に関する被害について定量的に評価した。

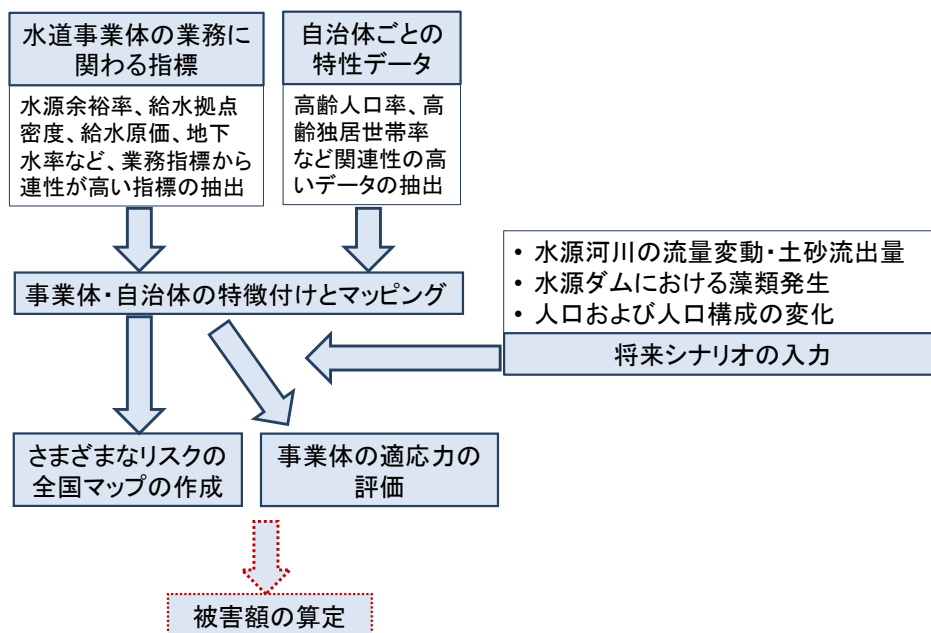


図1(3)⑤-2 研究のフロー

このような形でトップダウン型で影響人口や被害を求める全国のモデルを構築した。このうちダム湖の水質変動による被害については、全国の水道水源に用いられている37のダム湖を対象とした。

気候シナリオに基づくダム湖の水質変動と曝気循環施設による適応策の効果については「②水源における水質影響の評価」の成果を利用した。ダム湖ごとに推定された年平均クロロフィル $a$ 濃度が、 $8.0\mu\text{g/L}$ 以上となる場合を富栄養状態と定義し、そのダムを水源とする水道事業体が影響を受けるとみなして、影響人口を算出した。なお、複数の水源を利用している事業体については、水利権量に応じて給水人口を水源ごとに配分して計算した。また、ダム湖における曝気循環施設の費用を整理するとともに、汚濁負荷増加に伴う水道事業体の対策として高度処理施設を想定し、上記影響人口に対して対策を行う費用を算出して、これらの費用を相互に比較した。

#### 4. 結果及び考察

図1(3)⑤-3に将来のクロロフィル $a$ 濃度と影響人口を示す。ダム湖ごとに、2050年代、2100年代のクロロフィル $a$ 濃度をカテゴリで表示するとともに、影響人口を棒グラフで表示している。また、各事業体をその適応力によって濃淡で塗り分けしている。さらに、図1(3)⑤-4では対象とした37ダム湖からの給水人口とそのうちの影響人口、影響はあるものの既に高度処理が入っており対応できる人口を、適応策の有無および2通りのRCPに基づく4つのシナリオについて示す。

RCP2.6とRCP8.5では、RCP2.6の方が若干影響人口は減るものの、それほど大きな違いはない。それより、適応策の有無の方が影響人口に大きな違いをもたらしている。RCP2.6、RCP8.5とも適応策を導入することにより現状は影響人口がほとんどなくなるものの、2050年、2100年では3～5割程度の減少にとどまり、2050年には700万人、2100年も300～500万に程度の影響人口が予測された。人口減少により給水人口そのものが減っているため、影響人口の比率で考えると2100年にむけて増加することとなる。



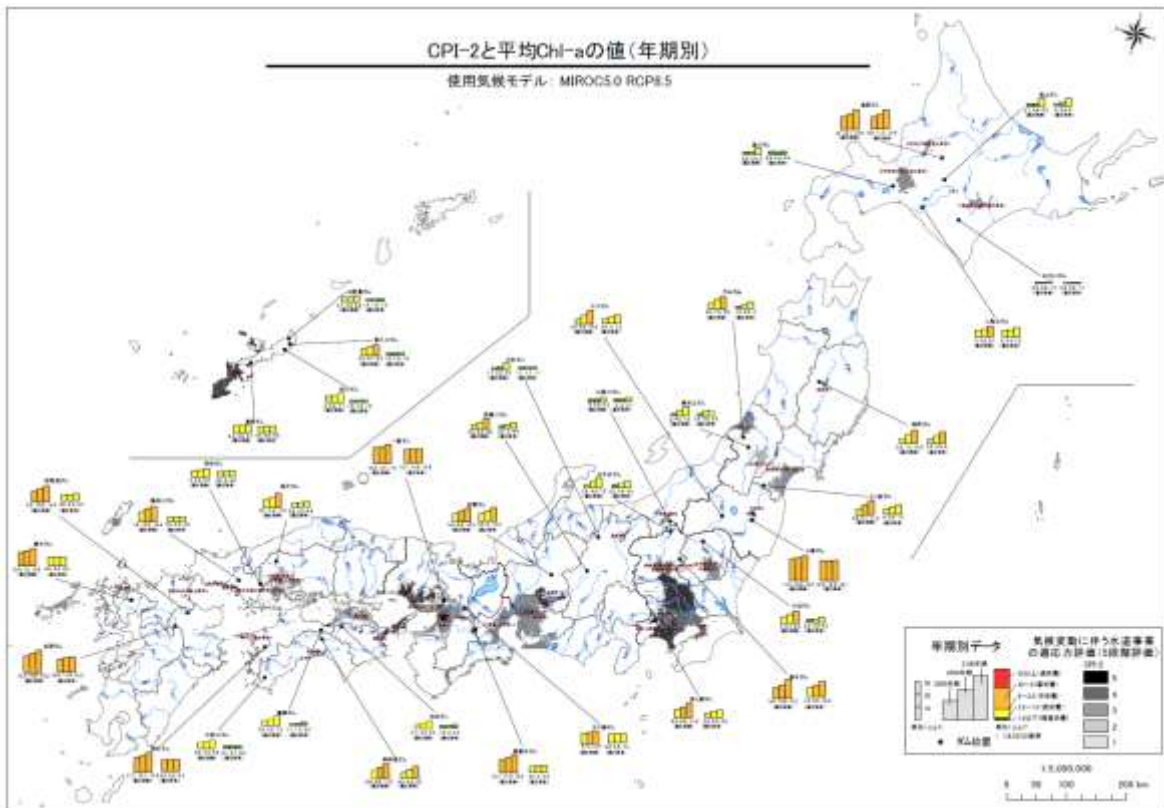


図1(3)⑤-3 将来のクロロフィルa濃度と影響人口（気候シナリオRCP8.5、適応策なし）

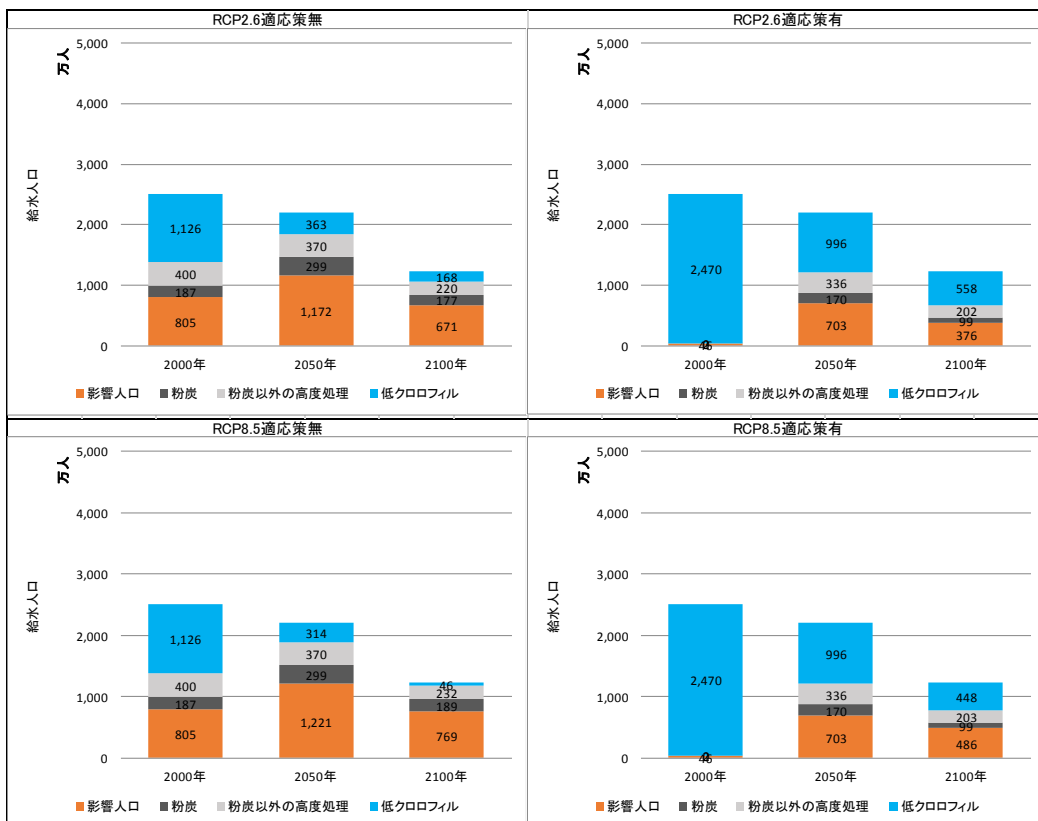


図1(3)⑤-4 シナリオごとの影響人口の違い

次に、曝気施設の設置費用を試算した結果、37のダム湖において適応策を導入した場合におよそ130億円かかる結果となった。一方で各ケースにおける浄水場に高度浄水に関する追加費用は表1(3)⑤-1の通りと推定された。適応策を導入することにより、2100年において250億円から290億円ほどコストが低減する結果となった。これらのコストの計算にはまだ不確定な要素が多いが、ダム湖における適応策にかかる費用と水道事業体における被害に対応する費用がほぼ同じオーダーとなっていることが示された。

表1(3)⑤-1高度浄水処理施設概算費用（百万円）

	RCP 2.6			RCP 8.5		
	2000年代	2050年代	2100年代	2000年代	2050年代	2100年代
適応策無	34,759	62,694	50,371	34,759	64,931	64,287
適応策有	8,009	29,764	21,055	8,009	29,764	38,992

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

温暖化による将来の水源地への影響を水道事業と結びつけて全国レベルで示した事例はない。また、高齢化といった社会指標と関連や、将来の人口減といった社会変化を考慮した影響評価を行っており、新しい知見を提供するものとなっている。

### (2) 環境政策への貢献

#### <行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

#### <行政が活用することが見込まれる成果>

適応力や予想される被害額を一定程度の精度をもって影響を示すことにより、将来的に国および地方自治体レベルでの環境政策への貢献が期待される。特に、本研究はトップダウン的な全国レベルでの評価に力点を置いているが、ここで示された結果から特に脆弱な地域や水道事業の形態などを抽出することができ、次のステップとしてそのような地域や事業形態に着目して、より詳細な影響評価や適応策の分析を進めていくことが可能となった。

## 6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### <論文（査読あり）>

- 1) 吉川泰代、矢部博康、小池亮、森本達男、小熊久美子、荒巻俊也、滝沢智：土木学会論文集 G、68(7)、Ⅲ\_147-Ⅲ\_156 (2012)

「水道ハザードマップを用いた自然災害による水道事業への影響評価」

- 2) 大山秀格、川本圭彦、小池亮、森本達男、小熊久美子、荒巻俊也、滝沢智：土木学会論文

集G、70(7), III\_131-III\_140 (2014)

「水道経営指標群を用いた気候変動に対する適応力評価手法の検討」

**<査読付論文に準ずる成果発表>**

特に記載すべき事項はない。

**<その他誌上発表（査読なし）>**

特に記載すべき事項はない。

**(2) 口頭発表（学会等）**

- 1) 渡辺直子、矢部博康、小池亮、森本達男、荒巻俊也、滝沢智：第19回地球環境シンポジウム（2011）  
「業務指標を用いた気候変動に対する小規模水道事業体の脆弱性評価」
- 2) 大山秀格、矢部博康、小池亮、森本達男、小熊久美子、荒巻俊也、滝沢智：水道研究発表会（2013）  
「水道ハザードマップを用いた孤立集落の災害対応力の分析」
- 3) 荒巻俊也：環境情報科学センター 第126回環境サロン（2014）  
「気候変動が及ぼす将来の水資源分野への影響」

**(3) 出願特許**

特に記載すべき事項はない。

**(4) 「国民との科学・技術対話」の実施**

特に記載すべき事項はない。

**(5) マスコミ等への公表・報道等**

特に記載すべき事項はない。

**(6) その他**

特に記載すべき事項はない。

**8. 引用文献**

特に記載すべき事項はない。

## Climate Change Impact on Water Resources and Adaptation Measures

Principal Investigator: Satoshi TAKIZAWA

Institution: Department of Urban Engineering, Graduate School of  
Engineering, the University of Tokyo.  
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656, JAPAN  
Tel: +81-3-5841-6241 / Fax: +81-3-5841-8532  
E-mail: takizawa@env.t.u-tokyo.ac.jp

Cooperated by: the University of Tokyo, National Institute of Public Health, Tohoku University, Toyo University

### [Abstract]

**Key Words:** Climate change, Suspended sediment, Forest transition, Reservoir, Eutrophication, Small water supply systems, Small islands, Water Supply, Adaptability, Water utilities,

The suspended sediment (SS) yield in the 109 rivers was estimated using a semi-distribution simulation model with AMEDAS, MIROC and on MRI-GCM (1980–2000) based on the scenario data from 2030-2100 based on the simplified TOPMODEL scheme. The river flow was estimated by the MATSIRO model based on the future forest species under the study theme of S-8-1(5). As a result, the SS yield in the 2090s increases significantly in the areas from the Kii peninsula to the Shikoku region from those in the 1990s. In the western Japan, the SS yield increases in summer and in autumn, while in Tohoku and Hokkaido areas, the variation of SS yield will be comparatively large. The increased cost of water treatment due to high suspended solids (turbidity) was estimated using the quantitative relationship between raw water turbidity and the dose of coagulant.

Future water quality assessment was conducted for 65 reservoirs in Japan considering the changes of future climate and watershed environment. Phytoplankton biomass in reservoirs was estimated using a vertical 1-dimensional water temperature and water quality model, and nutrient loading from the watershed. It was estimated that the future population decrease will reduce the nutrient load into the reservoirs. However, higher potential for eutrophication due to climate change was found especially in the northern regions of Japan. Although the ratio of affected population by phytoplankton will increase until the 2100s, the number of the affected population will reach a peak out in the 2050s due to natural population decline.

The adaptation capacity of small water systems to climate change were evaluated using Combined Performance Indicator (CPI). The results are presented in the nation-wide maps to make the outcomes visible and easily understandable. The maps were overlaid with existing hazard maps and distribution maps of elderly people, suggesting that some

small water systems are susceptible to climate change and need adaptation measures. In the meantime, drinking water sources in small islands were examined to understand unique features in the quality. High dissolved organic matter and bromide ion were noticeable, resulting in the high potential of byproducts formation by chlorination. Several water treatment technologies were applied to treat these water samples and the appropriate technologies for small islands were proposed.

In addition, monetary loss caused by cutoff of industrial water supply was estimated in the large cities in Japan.