

200942031A

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

気候変動に対応した飲料水管理
手法の開発に関する研究

平成21年度 総括・分担研究報告書

研究代表者 秋葉道宏
(国立保健医療科学院)

平成22(2010)年 3月

目 次

研究班の構成	1
I. 総括研究報告書	
気候変動に対応した飲料水管理手法の開発に関する研究	3
秋葉 道宏	
II. 分担研究報告書	
1. 気候変動による水道システムへの影響と適応策の整理	15
秋葉 道宏, 国包 章一, 山田 俊郎, 中村 怜奈	
2. 気候変動による水質・水量の変化と飲料水の水質管理への影響の評価 (ダム貯水池における水質の長期変動の解析)	25
柳橋 泰生	
3. 藻類増殖や濁水等、気候変動による水質・水量の変化と それに伴う飲料水の水質管理への影響評価	35
秋葉 道宏, 藤本 尚志, 柳橋 泰生, 山田 俊郎	
4. 気候変動による浄水処理への影響および対応技術の検討	45
秋葉 道宏, 伊藤 雅喜, 山田 俊郎, 古林 祐正	
5. 地理情報システム (GIS) を活用した気候変動に対応した 水道原水管理・評価手法の開発	63
増田 貴則	
III. 研究成果の刊行物・別刷	73

研 究 班 の 構 成

研究代表者

国立保健医療科学院水道工学部長

秋 葉 道 宏

研究分担者

国立保健医療科学院水道工学部水道計画室長

伊 藤 雅 喜

静岡県立大学環境科学研究所教授

国 包 章 一

東京農業大学応用生物科学部醸造科学科准教授

藤 本 尚 志

鳥取大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻准教授

増 田 貴 則

独立行政法人水資源機構環境室水環境課長

柳 橋 泰 生

国立保健医療科学院水道工学部主任研究官

山 田 俊 郎

研究協力者

東京都水道局総務部施設計画課長

青 木 秀 幸

国立保健医療科学院水道工学部研究生

古 林 祐 正

国立保健医療科学院水道工学部研究生

中 村 怜 奈

桐生市水道局水質センター主査

矢 島 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

気候変動に対応した飲料水管理
手法の開発に関する研究

平成21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22年3月

気候変動に対応した飲料水管理手法の開発に関する研究

研究代表者 秋葉道宏 国立保健医療科学院水道工学部長

要旨

本研究は、気候変動による飲料水の安全面への影響を明らかにし、気候変動に適応する有効な飲料水水質管理・飲料水施設管理のあり方を提示することを目的としている。本年度は、国内での既往の知見を整理し、気候変動による水道システムへの影響と適応策を明らかにすること、貯水池の水質の長期的変動および気候変動との関係を明らかにすること、また貯水池水源の生物相変化につき特に浄水障害となる藻類増殖の特徴を明らかにすること、洪水等で発生する原水の高濁度に対する浄水処理への影響を評価すること、地理情報システム(GIS)を活用した水源汚染リスク評価手法を開発すること目的とした。文献調査の結果、これまで指摘されている気候変動による水資源分野への影響に伴う水道システムに対する影響、施設への直接的な影響、自治体等で既に取り組みされている気候変動への緩和策および適応策等につき整理した。水温観測を長期間実施しているAダム貯水池（水深5m地点）では、2008年までの16年間で年平均水温が1℃程度上昇していることがわかった。一方、Bダム貯水池では、浅層曝気循環設備の影響を受けない水深60m地点において、2009年までの32年間で水温が2℃程度低下していた。水源ダム湖における真核ピコプランクトンの群集構造について分子生物学的手法を用いて解析したところ、6月は12グループ、7月は21グループ、8月は23グループに分類でき、湖水に多様な真核ピコプランクトンが存在すること、季節によって群集構造が異なることを明らかにした。また既知の種の他に、複数の新規の系統群の存在も示唆された。降雨による原水濁度急変時における急速ろ過システム及び凝集沈澱-膜ろ過システムの処理特性や運転管理への影響について、パイロットスケールプラントを用いて検討した結果、膜ろ過システムが原水濁度急変時においても確実な処理システムであること、砂ろ過プロセスへの負荷を緩和するには凝集沈澱プロセスでの濁度低減が不可欠であること、浄水中の残留アルミニウム濃度管理の観点から濁度急変時の凝集沈澱プロセス運転管理が重要であることを明らかにした。GISを用いた表流水の病原微生物汚染評価の際に利用可能な統計情報、地図情報を整理し、特に面的汚染源や上流土地状況の情報源として利用可能と考えられた地図情報、衛星画像、航空写真の利用可能性を明らかにした。また、これまで直接同定できる地理情報が得られない放牧場を複数の情報を組み合わせて同定する手法を考案した。さらにGISで比較的容易に管理可能な情報に基づいて、流量および病原微生物濃度の推定手法および取水地点上流の汚染源抽出手法を検討し、河川流量については河道・水路網と観測流量と農業・上水・発電用水取水

量の情報を用いることで精度良く計算できること、河道データおよび水道地図データは相互の整合性を踏まえて作成されていないため、水道取水地点から上流の集水域同定については現実と著しく異なることなどがわかった。

研究分担者： 伊藤 雅喜 国立保健医療科学院水道工学部水道計画室長
国包 章一 静岡県立大学環境科学研究所教授
藤本 尚志 東京農業大学応用生物科学部醸造科学科准教授
増田 貴則 鳥取大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻准教授
柳橋 泰生 独立行政法人水資源機構環境室水環境課長
山田 俊郎 国立保健医療科学院水道工学部主任研究官

研究協力者： 青木 秀幸 東京都水道局総務部施設計画課長
古林 祐正 国立保健医療科学院水道工学部研究生
中村 怜奈 国立保健医療科学院水道工学部研究生
矢島 修 桐生市水道局水質センター主査

A. 研究目的

IPCC 第4次評価報告書にも報告されているように、現在温暖化が生じていることは疑う余地はなく、気候変動に伴う水資源への様々な影響が指摘されている。水資源の量および質ともに直接影響を受ける飲料水供給の分野において、気候変動への緩和策と伴に、適応策を講じることが急務である。実際に、豪雨災害による水道施設への物理的な被害、濁度上昇による給水停止、濁水による給水制限、藻類増殖の進行による浄水障害や異臭味被害等が発生しており、また豪雨による濁水発生が過去の多くの飲料水を介した感染症流行事例の要因とされており、飲料水管理において気候変動への適応は健康危機管理上重要な課題であるといえる。

本研究は、気候変動による飲料水の安全面への影響を明らかにし、気候変動に適応する有効な飲料水水質管理・飲料水施設管理のあり方を提示することを目的としている。豪雨や濁水等これまでに経験した危機とその対応を整理・分析するとともに、気候変動による飲料水の原水水質への影響に着目し、水源水質の長期的な変化等状況の把握と、浄水処理等に与える影響および浄水処理における有効な対応策を明らかにする。さらに GIS を用いた気候変動による飲料水管理上のリスクを判断するための手法の開発を行い、以上より将来の気候変動に適応できる飲料水管理の方策を提示する。

B. 研究方法

1. 気候変動による水道システムへの影響と適応策の整理

既往の公開資料、インターネット情報を中心に文献検索を行い、水道等飲料水供給システムに対する気候変動の影響および対応策に関する事例や情報を収集・整理した。特に、学術誌や水道に関連する専門誌に掲載された文献につき、JDreamII（独立行政法人科学技術振興機構運営）等の文献検索サービスを用いて15誌を対象として実施した。

2. 気候変動による水質・水量の変化と飲料水の水質管理への影響の評価（ダム貯水池における水質の長期変動の解析）

水資源機構で管理している51のダム貯水池のうち、長期的にデータ（原則として月1回、環境基準設定項目や富栄養化関連項目等）が蓄積されている20のダム貯水池を対象として統計解析を行い、水位、水温、水質等の長期的傾向を検討した。期間は最も長いもので1975年から2008年までの34年間で、最も短いものは2001年から2008年までの8年間である。

3. 藻類増殖や濁水等、気候変動による水質・水量の変化とそれに伴う飲料水の水質管理への影響評価

群馬県草木ダムから6月、7月、8月に試料を採取し、真核ピコプランクトンの群集構造について分子生物学的手法により解析し、さらにピコプランクトンの分離について検討した。

4. 気候変動による浄水処理への影響および対応技術の検討

降水量の増加や大雨日数の増加で生じる急激な河川原水濁度上昇時を想定し、日本の主要な浄水処理システムである凝集沈澱-砂ろ過システム及び凝集沈澱-膜ろ過システムを有するパイロットスケールプラントにおいて、濁度やアルミニウム等の処理性や砂ろ過損失水頭や膜差圧等の運転管理に関わる項目について実験的検討を行った。

5. 地理情報システム（GIS）を活用した気候変動に対応した水道原水管理・評価手法の開発

面的な汚染源を面的な情報として捉えることのできると考えられる土地利用や植生、衛星画像などの情報を調査し、面的汚染源である「放牧場」情報の実態を比較考察した。また研究分担者らがこれまでに開発したGISによる上流汚染源解析において、同定された集水域の違いが汚染源抽出に与える影響を検討するとともに、集水域同定が現実のものとなる原因を検討した。

（倫理面への配慮）

人体試料を用いた実験や動物実験等、倫理上問題となるような実験や調査は行っていない。

C. 結果と考察

1. 気候変動による水道システムへの影響と適応策の整理

1985年1月から2009年7月まで過去25年間において、気候変動と水に関連する文献は

735 件あり、うち特に水道をキーワードに含むものは 80 件あった。抄録の内容から、気候変動による水道への影響に関連する文献につき計 54 件を抽出した。気候変動によって引き起こされる様々な現象のうち、水道システムへの影響が大きいと考えられるものとして、気温の上昇、降雨量の増加、降雨変動の増大・降雨パターンの変化、豪雨の発生回数の増加、無降雨日数の増加、降雪量の減少と雪解けの早期化、海面の上昇等があった。また水道システムを河川やダム、地下水などの水源系、浄水処理場などの処理系、配水管や配水池、受水槽などの給配水系と分割した場合、水源系への影響としては、渇水被害、洪水被害、臭いの原因となる物質の増加、重金属の溶出、下水や汚染物質の流入、農薬汚染状況の変化、井戸水の塩水化等が挙げられ、処理系への影響として、水質悪化による処理機能への影響、処理で使う薬品量の増加、浄水汚泥や廃棄物の増加、水没による被害が挙げられた。また給配水系においては雷による送水ポンプの停止、斜面の崩壊、塩素の不足、病害虫の発生などが考えられた。これまで日本において渇水、洪水、濁水、高潮によって水道システムが被害を受けた事例を収集・整理し、最近でも浄水場浸水や高濁水による断水被害が発生している状況を示した。水道分野で考えられる気候変動への適応策のうち、渇水や洪水への直接的対策としてはダムの新規建設の他、既存のダム群の再編や、異なる水源の間で融通管を設置することによるバックアップシステムの構築、雨水利用の促進、雨水の表面流出防止、地下水の保全、水源涵養林の保全が考えられる。ダム湖等の閉鎖性水域における対策としてばっ気循環装置の導入やアオコフェンス、選択取水施設の設置、上流からのバイパス管の設置などが実施されている。処理系における気候変動への適応を目的として実施されている事例は見られなかったが、オゾンや紫外線による消毒や膜によるろ過技術を用いた高度浄水処理の導入が各地の水道事業者などで進められており、これらは気候変動に伴う影響への対策としても有効と考えられる。浄水場では洪水や落雷など自然災害に備え、自家発電装置の設置等の整備強化が図られている。給配水系における対策として配水池での塩素の追加注入、直結給水の推進、受水槽点検などがある。

2. 気候変動による水質・水量の変化と飲料水の水質管理への影響の評価（ダム貯水池における水質の長期変動の解析）

各ダム貯水池で月 1 回測定が行われている定期調査結果について、線形近似し傾きを求めたところ、20 のダム貯水池の気温、水温、富栄養化関連項目について、個々では上昇や低下の傾向はみられるものの、共通して上昇あるいは低下しているなどの一定の長期的変動の傾向はみられなかった。水温観測を長期間実施している A ダム貯水池（水深 5m 地点）では、2008 年までの 16 年間で年平均水温が 1°C 程度上昇していることがわかった。一方、B ダム貯水池では浅層曝気循環設備の影響を受けない水深 60m 地点において、2009 年までの 32 年間で水温は 2°C 程度低下していた。水質の変動を解析した結果、C ダム貯水池では約 30 年間で総窒素濃度及び硝酸性窒素濃度が倍増しており顕著な長期的変動が見られた。また D ダム貯水池では底層の溶存酸素が低下傾向にあることが明らかになった。

3. 藻類増殖や渇水等、気候変動による水質・水量の変化とそれに伴う飲料水の水質管理

への影響評価

草木ダム湖の水試料に含まれるピコプランクトンにつき遺伝子解析を行ったところ、6月は e0906-1~e0906-12 の 120OTUs, 7月は e0907-1~e0907-15 の 150OTUs, 8月は e0908-1~e0908-23 の 230OTUs, 10月は e0910-1~e0910-13 の 130OTUs に分けられた。光合成をおこなう真核ピコプランクトンは6月と10月に 10^4 cells/ml を超え、7月と8月は 5000 cells/ml 以下であったが、細胞数が低いときに OTU 数が増加する傾向が見られた。グループ分けを行った各月の OTU の 18S rDNA 塩基配列の FASTA による相同性検索の結果、それらはハプト藻綱、クリプト藻綱、緑藻綱、渦鞭毛藻綱、プラシノ藻綱、ストラメノパイル、アルベオラータなどに近縁のもので、湖水に多様な真核ピコプランクトンが存在することがわかった。また、クリプト藻綱、ストラメノパイルに近縁なクローンは6, 7, 8, 10月すべての月で検出された。アルベオラータに近縁なクローンは6, 7, 8月検出された。一方、プラシノ藻綱に近縁なクローンは光合成をおこなう真核ピコプランクトン数が高い6月と10月に検出され、季節によって群集構造が異なることがわかった。しかし、多くの OTU において近縁種との相同性が 90%以下と低く、既知の種の他に、複数の新規の系統群の存在が示唆された。各月において解析した 48 クローンについて各分類群の割合の推移を検討した結果、6月はクリプト藻綱とストラメノパイルの割合が大きいことが明らかとなった。7月はアルベオラータの割合が大きく 80%を占め、8月はアルベオラータとストラメノパイルの割合が大きいことが明らかとなった。10月はクリプト藻綱の割合が大きい。このように真核ピコプランクトンの生物相が季節によって変化することが示唆された。6月、10月はピコプランクトンの細胞数が高く (10^4 細胞/ml 以上)、その時に、クリプト藻綱の割合が高いことから草木湖における主要なピコプランクトンはクリプト藻綱に属することが示唆された。

4. 気候変動による浄水処理への影響および対応技術の検討

大雨による原水濁度上昇を想定し、原水濁度を 5 度 (通常時濁度)、30 度 (降雨時濁度)、300 度 (大雨時濁度) の 3 段階で、凝集剤注入率は濁度急変時に凝集剤注入が追従できない場合も想定し極力 36mg/L で一定としたが、沈澱水濁度の状況によって 72mg/L とした。沈澱水濁度については、凝集剤注入率 36mg/L 条件において、原水濁度 5 度の場合で沈澱水濁度は約 1 度、原水濁度が 30 度の場合で沈澱水濁度は約 3 度となった。原水濁度を 300 度とすると沈澱水濁度が約 10 度となったため、設定凝集剤注入率を 72mg/L に増加した結果、沈澱水濁度は約 6 度へ低下した。このように、沈澱水濁度は、原水濁度の上昇に伴い上昇し、原水濁度の下降に伴い低下し、凝集剤注入率の増量で沈澱水濁度は低下し、凝集剤注入率の減量で沈澱水濁度が上昇した。原水濁度と凝集剤注入率が同一であれば、安定後の沈澱水濁度は原水濁度の上昇時及び下降時と同程度となり、差異は認められなかった。砂ろ過水濁度については、原水濁度の上昇に伴い、砂ろ過洗浄直後の濁度も上昇する傾向が見られた。また、原水濁度の上昇に伴い、砂ろ過池洗浄直後に上昇した時間経過と共に低下する砂ろ過水濁度の低下速度が緩やかになる傾向が見られ、原水濁度と凝集剤注入率の条件が同一であれば、この低下速度は同程度となった。これらは、原水濁度の上昇によ

り砂ろ過原水である沈澱水濁度が上昇したことで砂ろ過への負荷が増大したことに加え、原水濁度の上昇により砂ろ過に流入したフロックが砂ろ過では捕らえにくい性状に変化したことによるものと考えられる。原水濁度が上昇することで沈澱水濁度は上昇したが、損失水頭上昇速度は減少する傾向を示した。また、同じ原水濁度で比較すると、原水濁度 5 度と 30 度の条件では、凝集剤注入率の増加により沈澱水濁度が低下し、損失水頭上昇速度も減少する傾向を示したが、原水濁度 300 度では、凝集剤注入率の増加により沈澱水濁度は低下したが、損失水頭上昇速度は増加する逆の傾向を示した。膜ろ過に関しては、膜ろ過水濁度が、今回の全ての運転条件において検出限界値以下となり、膜差圧挙動も原水濁度の変化及び凝集剤注入率の変更等の条件による大きな差異は認められなかったことから、濁度急変時においても確実な濁質除去及び安定した運転管理性が認められた。平成 21 年 4 月に水質管理目標設定項目に追加されたアルミニウム濃度については、砂ろ過処理水及び膜ろ過水ともに沈澱水中の溶解性アルミニウムと同等量が検出されたことから、濁度急変時においても最終処理水中アルミニウム濃度を抑制するには、凝集沈澱池におけるコントロールが不可欠であることが改めて示された。

5. 地理情報システム (GIS) を活用した気候変動に対応した水道原水管理・評価手法の開発

放牧場を対象として面的汚染源に関する情報源情報の調査を行った結果、利用可能な情報源として無償のもの 4 つ、有償のもの 2 つが得られた。環境省が公表している自然環境情報 GIS の現存植生図は複数の群落名フィールドを属性値としてっており、群落名フィールド内には複数の土地用途が示されるケースがあるため、ゴルフ場やスキー場ではない牧草地を示すことはできるが、それが放牧場を表示しているかはわからなかった。国土数値情報ダウンロードサービスで提供されている平成 3 年度土地利用メッシュは、自然環境情報 GIS で牧草地としていた箇所の土地利用も把握できるが、「その他の農地」とは普通畑、果樹園、桑園等様々な農地を意味しており、電話帳情報等で得られるポイント位置情報の周辺に広がる「その他の農地」というメッシュが放牧場であるか確認できない問題があることがわかった。Google Earth による衛星画像および国土交通省によるオルソ化空中写真ダウンロードシステムからダウンロードできる画像のどちらを用いても面的な広がり確認できるが、牧草地境界を同定することは難しく、Google Earth では画像解析度の程度に地域差があること、撮影年度が様々であるという問題があることから、汚染要因を詳細に把握するために使用するのには難しい。オルソ化空中写真は Google Earth より解析度が良く、また全国的に撮影されているものの、撮影年度が古い問題があった。市販の地図データ (ArcGIS データコレクションスタンダードパック 2009) において、自然・緑地施設面に分類されるものに放牧場を含む牧草地を面的に表すことはできるが、放牧場の位置を同定することはできないと考えられる。しかしこのデータを用いることで他のデータの短所を改善できる点があり、このデータはゴルフ場を示すレイヤーがあるため自然環境情報 GIS で牧草地となっていた場所をゴルフ場と区分することが可能となること、アノテーションと

して施設名を表示するレイヤーが準備されているため、そこに名称が収録されている場合にはスキー場や高原を区分し、放牧場を同定できる場合が示唆された。

これまでに開発した水源上流の河川や集水域を水道地図の取水点データおよび 50m メッシュの標高 DEM データ、河川のベクターデータを用いて識別する手法では、取水地点に最も近い河道メッシュを探し、その上流域を取水点の集水域とすることにしているが、水道の取水点がどの集水域を下ってきた河川から取水しているのかを正しく判別できず、その結果として上流汚染源の情報を正確に抽出できないことにつながるということが分かった。この理由を検討したところ、水道地図から取得した取水源の位置が、自動識別された河道メッシュの河川位置からずれていたためと判明した。これは水道地図の縮尺が 50000 分の 1 と粗いため取水源の位置を精度良く示すことができていないことや、50m メッシュ程度の DEM では河川の形状を再現できない部分があること、あるいは、河川ベクターデータの入力誤差に起因し河川形状を再現できていない場合があることが原因と判明した。水道地図や標高データのような位置的データセットのみに頼るのではなく、取水源と取水対象河川との関係性を示すようなデータセットをあらかじめ準備し、間違った上流識別を行わないような仕組みを考案する必要がある。

D. 結論

本研究による成果の概要は以下のとおりである。

(1) 過去の文献を収集し、これまで指摘されている気候変動による水資源分野への影響に伴い、水道等の飲料水供給に対する影響、施設への直接的な影響、自治体等で既に取り組みされている気候変動への緩和策および適応策等につき整理した。

(2) 水温観測を長期間実施している A ダム貯水池(水深 5m 地点)において、2008 年までの 16 年間で年平均水温が 1°C 程度上昇していることがわかった。一方、B ダム貯水池では浅層曝気循環設備の影響を受けない水深 60m 地点において、2009 年までの 32 年間で水温は 2°C 程度低下していた。全国 20 のダム貯水池の水質の変動を解析した結果、C ダム貯水池では約 30 年間で総窒素濃度及び硝酸性窒素濃度が倍増しており顕著な長期的変動が見られた。また D ダム貯水池では底層の溶存酸素の低下傾向が明らかになった。

(3) 草木ダム湖の水試料に含まれるピコプランクトンにつき遺伝子解析を行ったところ、6 月は 12 グループ、7 月は 21 グループ、8 月は 23 グループに分類でき、それらはハプト藻綱、クリプト藻綱、緑藻綱、渦鞭毛藻綱、プラシノ藻綱、ストラメノパイル、アルベオラータなどに近縁のもので、湖水に多様な真核ピコプランクトンが存在すること、季節によって群集構造が異なることがわかった。また既知の種の他に、複数の新規の系統群の存在も示唆された。従来ピコプランクトンは落射蛍光顕微鏡を用いた観察により 3 グループに分けて定量されてきたが、本研究において実湖水中には多様なピコプランクトンが存在することが明らかとなり、本手法による優占種とその季節変化の解明、濁度障害原因種の特定とそのモニタリングを行うことが今後必要となる。

(4) 降雨による原水濁度急変時における急速ろ過システム及び凝集沈澱-膜ろ過システムの処理特性や運転管理への影響について、パイロットスケールプラントを用いて実験的検討した。その結果、砂ろ過においては沈澱水濁度の上昇により砂ろ過水初期濁度の上昇や初期濁度低下速度の低下、砂ろ過損失水頭上昇速度の低下等の影響が見られたのに対し、膜ろ過においては除濁性及び膜差圧上昇への明確な影響は見られなかったことから、膜ろ過システムは原水濁度急変時においても確実な処理システムであることがわかった。砂ろ過プロセスへの負荷を緩和するには、凝集沈澱プロセスでの濁度低減が不可欠であり、凝集剤由来で残留するアルミニウムは砂ろ過や膜ろ過でも除去できないことから、濁度急変時の凝集沈澱プロセス運転管理の重要性が示唆された。

(5) 表流水の病原微生物汚染評価の際に利用可能な統計情報、地図情報を整理し、特に面的汚染源や上流土地状況の情報源として利用可能と考えられた地図情報、衛星画像、航空写真の利用可能性を明らかにした。放牧場を直接同定できる情報源は存在しておらず草地とゴルフ場などが区分されている民間会社の地図情報やその他の複数の情報を組み合わせることで同定が可能と考えられた。また、GIS で比較的容易に管理可能な一般的な流域情報や河道などの情報に基づいて、渇水時や豊水時の河川流量および病原微生物濃度を計算する手続きや、取水地点から上流を同定し汚染源情報を抽出する手続きを検討したところ、河川流量については河道・水路網と観測流量と農業・上水・発電用水取水量の情報を用いることで精度良く計算できることを示した。一方、河道データおよび水道地図データは相互の整合性を踏まえて作成されていないため、水道取水地点から上流の集水域同定については著しく現実と異なることがあるとわかった。

E. 健康危険情報

該当なし

F. 研究発表

別添のとおり

G. 知的所有権の取得状況

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

気候変動に対応した飲料水管理
手法の開発に関する研究

平成21年度 分担研究報告書

平成22年3月

分担研究報告書 1

気候変動による水道システムへの影響と
適応策の整理

研究代表者 秋葉 道宏
研究分担者 国包 章一, 山田 俊郎
研究協力者 中村 怜奈

気候変動による水道システムへの影響と適応策の整理

研究代表者： 秋葉 道宏 国立保健医療科学院水道工学部長
研究分担者： 国包 章一 静岡県立大学環境科学研究所教授
山田 俊郎 国立保健医療科学院水道工学部主任研究官
研究協力者： 中村 怜奈 国立保健医療科学院水道工学部研究生

A. 研究目的

気候変動に関する政府間パネル (Intergovernmental panel on climate change, IPCC) の第4次評価報告書においても指摘されているように、気候システムの温暖化にはすでに疑いの余地がなく¹⁾、気温の上昇にともなって豪雨の頻発や、降雨量、積雪量の減少などの様々な気象の変化が生じ、水の循環に多大な影響を与えると考えられる。その結果、洪水といった突発的災害だけでなく、渇水やそれに伴う水質悪化など水利用での重大な問題を引き起こし、自然の水資源に依存している水道システムは、気候変動によって直接的、あるいは間接的に様々な影響を受けることが想定される。将来にわたって安全な水道水を安定して得るためには、今後想定される気候変動によって引き起こされる水道システムへの影響を明らかにし、被害を低減・回避するための対策を推進していく必要がある。そこで本研究では、気候変動により将来、わが国の飲料水の供給に起こりうる影響を把握するため、これまで経験した豪雨あるいは渇水といった異常気象によって水道システムが受けた被害影響を整理しその種類や傾向を明らかにすることを目的とした。過去に生じた事例を文献等により収集・整理するとともに、これまでに気象の変化に伴って生じる被害を軽減する目的で取り組まれた対策（適応策）や、水道における温室効果ガス排出抑制（緩和策）の事例についても文献等による調査を行った。

B. 研究方法

既往の公開資料、インターネット情報を中心に文献検索を行い、水道等飲料水供給システムに対する気候変動の影響および対応策に関する事例や情報を収集し、整理した。特に、学術誌や水道に関連する専門誌に掲載された文献につき、JDreamII（独立行政法人科学技術振興機構運営）等の文献検索サービスを用いて、環境科学会誌（環境科学会）、環境工学研究論文集（土木学会環境工学委員会）、水工学論文集（土木学会）、水道（全国簡易水道協議会）、水道協会雑誌（日本水道協会）、水道公論（日本水道新聞社）、水道技術ジャーナル（水道技術研究センター）、水文・水資源学会誌（水文・水資源学会）、土木学会誌（土木学会）、土木学会論文集（BおよびG、土木学会）、水環境学会誌（日本水環境学会）、用

水と廃水（産業用水調査会），陸水学会誌（日本陸水学会），全国水道研究発表会講演集（日本水道協会），日本水環境学会年会講演集（日本水環境学会）の15誌を対象として実施した。

C. 結果及び考察

(1) 文献検索結果

1985年1月から2009年7月まで過去25年間において，気候変動と水に関連する文献は735件あり，うち特に水道をキーワードに含むものは80件あった。抄録の内容から，気候変動による水道への影響に関連する文献につき計54件を抽出した。内訳として，原著論文は14件，総説その他は40件あった。多くは1990年代後半から発表された文献であり，2008年は18件と特に発表数が多い。

(2) 気候変動が水道システムに与える影響

気候変動によって引き起こされる様々な現象のうち，水道システムへ与える影響が大きいと考えられるものとして，気温の上昇，降雨量の増加，降雨変動の増大・降雨パターンの変化，豪雨の発生回数の増加，無降雨日数の増加，降雪量の減少と雪解けの早期化，海面の上昇等がある²⁾。

水道システムを，河川やダム，地下水などの水源系，浄水処理を行う処理系，浄水を各家庭への送る配水管や配水池，さらに受水槽等の給配水系に分け，それぞれで生じる主要な影響をまとめたものを表1に示す。

表1 水道システムに生じる主要な影響

水道システム	主 要 な 影 響
水源系	渇水被害，洪水被害，臭いの原因となる物質の増加，重金属の溶出，下水や汚染物質の流入，農薬汚染状況の変化，井戸水の塩水化
処理系	水質悪化による処理施設への影響，処理で使う薬品量の増加，浄水汚泥や廃棄物の増加，水没による被害
配水系 給水系	雷による送水ポンプの停止，斜面の崩壊，塩素の不足，病害虫の発生

水源系に対する影響として、気温の上昇、降雨や融雪パターンの変化に伴う洪水や渇水が挙げられる。気温の上昇は、水温や地下水温の上昇、地表からの蒸発散量の増大等につながる。例えば、国内の一級河川における気温または日照量と水質の経年変化に対する統計解析の結果、気温の1℃上昇に対して水温は約0.84℃から0.89℃上昇するとの報告がある³⁾。気温上昇に伴う水温上昇によって、ダム湖などでは藻類等の増殖が促進され、飲料水の異臭味原因物質による汚染の進行が懸念される。また、藍藻毒 microcystin を産生する Microcystis 属が水温上昇とともに各地で発生しやすくなるとの報告もある⁴⁾。水温上昇はダム湖内の水循環を悪化させ、湖底が嫌気化するに伴い重金属が溶出する等の問題も生じる。気温の上昇は直接的な水資源への影響だけでなく、作物の種類や量が変化することに伴い農薬の使用実態が変化し、水源の農薬汚染状況が変化することも考えられる。一方、降雨量の増大によって洪水が発生し、濁水発生期間の長期化や水源への汚染物質の流入による水質悪化が考えられる。降雨や融雪パターンの変化や無降雨日水の増加は渇水リスクの増大につながり、希釈水量の減少等により水源水質の悪化をもたらすことも考えられる。また、高潮等による海面水位の上昇は、沿岸地域の地下水への海水浸入につながり、水源として利用している井戸水が塩水化する恐れがある²⁾。

処理系に対する影響としては、洪水や高潮によって浄水場が水没する直接的な被害や、洪水や渇水に伴う水質悪化による処理負荷の増大が考えられる。特に大雨で土砂の流出が発生し、濁水が長期化することによって既存の浄水処理設備での対応が困難となり、断水に至る事態もありうる。浄水処理で対応が可能な場合においても処理で使われる薬品量の増加や、それに伴って発生する浄水汚泥や廃棄物の増加等の問題が生じる可能性がある。水温上昇に伴う藻類の大量発生はろ過障害を引き起こすことが考えられる⁵⁾。

配水系および給水系に対する影響としては、雷を伴う豪雨発生によって停電が生じ、送水するポンプが停止する等のリスクが考えられる。また、大雨による斜面崩壊で送配水管路の破断といった直接的な被害の可能性もある。気温上昇は、配水池や配水管路内での塩素消費量の増大につながり、給水栓まで必要な塩素が不足し、管理の不十分な受水槽等では病害虫が発生する可能性も考えられる。

(2) 気象の変化に起因する水道システムへの被害事例

これまで日本において渇水や大雨など極端な気象によって水道システムが被害を受けた事例を示す。

a) 渇水

近年、わが国において渇水が各地で発生し、給水制限や減圧給水など水道水供給に影響した事態が生じている。平成20年は降雨量が平年よりも少なく、全国の30ダムにおいて取水制限が行われ、合計144万人が影響を受けた⁶⁾。特に四国の早明浦ダムでは一時貯水率が0%となるほど深刻な渇水となり、124日間の取水制限が行われる等大きな影響を受けた。

b) 洪水

・平成 17 年 9 月，宮崎県宮崎市において洪水による浄水場浸水被害が発生した。台風 14 号によって，多いところでおよそ 1000mm という約 380 年に一度の規模の大雨が発生し，この大雨によって浄水場全体が冠水した。浄水場の機能が停止し，約 18500 世帯が断水となる被害が発生した⁷⁾。

・平成 21 年 7 月，山口県において集中豪雨により浄水場が浸水し，浄水処理が不可能となり約 35,000 戸が最長 10 日間断水となった⁸⁾。

・平成 21 年 7 月，長崎県において集中豪雨による土砂崩れで，道路下に埋設されていた水道管が破損し，約 17500 戸が最長 5 日間断水となった⁹⁾。

c) 濁水

・平成 19 年 9 月，東京都奥多摩地域では観測史上最大の降雨が発生し，東京都の水源である小河内ダムにおいて高濁水状態が 3 カ月以上続いた。小河内ダムを水源とする下流浄水場では取水量を減らし，減量分を別の水源を利用している浄水場から補てんする対応がとられた¹⁰⁾。

・平成 19 年 6 月，北海道北見市において，時間降水量 50mm の集中豪雨が上流で発生し，最高濁度 15,000 度の濁水が原因となり，市内全域（約 58000 世帯）が長時間断水となる大規模な被害が発生した¹¹⁾。

・給水人口 3,117 人の A 市簡易水道の水源河川に，集中豪雨により肥料施設から汚泥が流入し，取水停止となった。直後に水源を変更し給水を開始したが，400 世帯が断水となり，下流の養殖魚が全滅した。

d) 高潮

・平成 20 年 2 月，富山湾沿岸域で発生した高波により，飲用利用されている井戸水に海水が流入する塩水被害が発生した。被害の最も大きい富山県入善町の一部の井戸では，高い塩分濃度によって飲用ができない状態が 3 カ月以上続くなどの被害を受けた¹²⁾。

(3) 気候変動への水道分野における適応策と緩和策

気候変動に対する取り組みは，適応策と緩和策に分類することができる。前者は，気候変動とそれに伴って生じる現象に直接的に対応し，影響を軽減しようとする対処療法的なもので，具体的にはインフラの整備，法や制度の整備，経済的な取り組みなどが挙げられる。後者は，地球温暖化の原因となる温室効果ガスの排出を削減することによって温暖化の進行を抑制する根本的な対策で，例えば省エネやエネルギー利用の効率化，二酸化炭素の回収や蓄積などが挙げられる。適応策と緩和策はどちらも不可欠で，バランスのとれた対策が必要とされる。水道分野で考えられる気候変動への適応策および緩和策につき表 2 に示した。

表2 水道分野において有効と考えられる気候変動への適応策および緩和策

	目 的	取 組 み
適 応 策	渇水・洪水対策	ダムの建設, 既存のダム群の再編, バックアップシステムの構築, 雨水利用の促進 水源涵養林の保全活動
	貯水池の水質保全	ばっ気循環装置の導入, フェンスの設置 選択取水装置の設置, バイパス管の設置
	水質汚染対策	高度浄水処理の導入
	災害への対策	自家発電装置の設置, 施設整備の強化
	安全で良質な 水の供給	配水池での塩素の追加注入 直結給水方式への変更の促進, 衛生管理の推進
緩 和 策	二酸化炭素排出量の削減	自然エネルギー・新エネルギーの利用 機器の効率的な使用 消費電力の少ない機器への変更 効率的な給水の推進

a) 水道分野における適応策例

渇水や洪水への直接的対策として、ダムの建設が挙げられる。現在、洪水の抑制や農業用水、生活用水の確保を目的として、国土交通省および水資源機構により 50 のダムが建設されている⁶⁾。渇水への対策としては、ダムの新規建設の他、既存のダム群を再編すること⁶⁾や、異なる水源の間で融通管を設置することによるバックアップシステムの構築、雨水利用の促進などがある。また、雨水の表面流出の防止や、地下水の保全、環境保護に貢献する水源域での重要な取り組みとして、市民ボランティア活動などを含む水源涵養林の保全活動が地方自治体等で行われており^{13) 14)}、気候変動への適応策としてその重要性が高まると考えられる。

ダム湖等の閉鎖性水域では、富栄養化によって異常増殖したアオコ等の藻類の抑制対策としてばっ気循環装置の導入や、流出抑制を目的としたフェンスの設置などが行われている。湖内の水質悪化による影響を軽減する対策として、水深方向に取水口を移動させて取

水する選択取水施設の設置が行われている¹⁵⁾。ダム湖内での濁水の長期化対策として、上流からのバイパス管の設置（浦山ダム等）なども実施されている。

水道システムにおける処理系において、気候変動への適応を目的として実施されている対応事例は見られなかったが、水道水質の悪化やクリプトスポリジウム等の耐塩素性病原微生物汚染リスクの高まりを背景に、現在オゾンや紫外線による消毒や膜によるろ過技術を用いた高度浄水処理の導入が各地の水道事業体などで進められており、気候変動に伴う影響への対策としても有効と考えられる。平成19年度末時点において、全国浄水場施設の約2%で膜処理が導入されている¹⁶⁾。また、浄水場では洪水や落雷など自然災害に備え、自家発電装置の設置等の整備強化が図られている。洪水による浸水被害をうけた宮崎県宮崎市の浄水場では、その後改修が行われ、コンクリート製止水壁の高さを浸水前の2倍となる5.5mとし、隣接する河川堤防よりも高くすることで洪水への対策が取られた。

配水系や給水系における対策として有効なものとして、配水池での塩素の追加注入がある。また、より良質な水を供給するため、特に集合住宅や学校等において高架水槽等受水槽を使わず水道本管からの圧力で直接給水する直結給水方式への変更が進められている。受水槽を水道事業体が保健所と協力して、受水槽の点検をするなど衛生管理の推進も行われている¹³⁾。

国外では気候変動による水資源量の減少と経済発展や人口増加に伴う水需要の増加が同時に生じている地域があり、気候変動への対応策の中でも水資源確保により積極的に取り組まれている。特に水資源の乏しい地域では下水処理水を再利用することで水資源の確保が行われており、例えば、カリフォルニア州では下水処理水を地下に涵養し、地下水資源として再利用が行われている¹⁷⁾。シンガポールでは下水処理水を逆浸透膜によるろ過や消毒などの処理を行うことで、“NEWater”として飲料水として配水されている¹⁷⁾。オーストラリア西部パースでは水資源確保として海水淡水化が進められている¹⁸⁾。

b) 水道分野における緩和策例

気候変動の緩和策は、温室効果ガスである二酸化炭素の削減の取組みが主であり、水道分野においてエネルギー削減に付随する二酸化炭素排出量削減が実施されている。

実施されている主な緩和策として、水道システムにおける自然エネルギー・新エネルギーの利用が挙げられる。浄水場の沈殿池をカバーするように太陽光発電パネルを取り付け浄水場内の電灯などに活用するなど、浄水場での使用電力が補われている¹³⁾¹⁴⁾。また水源から浄水場までの導水や浄水場から各家庭までの送水・配水の管路において、高低差を利用した小規模水力発電装置が設置されている例もある¹⁴⁾。

機器の効率利用や、消費電力の少ない機器への変更なども水道分野における緩和策として挙げられる。例えば、管路内を流れる水量に合わせて回転数を変化させるインバーターポンプの設置は、水利用量の少ない夜間の使用電力量を削減することができる。また、NaS電池等の活用により、夜間に発電・蓄電して昼間の使用電力量を削減する例もある¹⁴⁾。

水道システムにおいて最もエネルギーを使用するのは配水過程であり、効率的な給水の