

特集：気候変動による日常生活や健康への影響を考える

<総説>

気候変動影響に対する水道システムの適応策

小坂浩司, 秋葉道宏

国立保健医療科学院生活環境研究部

Adapting water supply systems to meet the impacts of climate change

KOSAKA Koji, AKIBA Michihiro

Department of Environmental Health, National Institute of Public Health

抄録

水道システムは、気候変動によって水質、水量、水道施設に対して様々な影響を受ける可能性がある。水質への影響として、藻類の増殖による異臭味等の生物障害、消毒副生成物前駆物質濃度の上昇による消毒副生成物濃度の上昇、洪水による濁度の上昇、塩水遡上による原水への塩分の混入等が挙げられた。近年は、大雨や台風にもなう洪水によって、水道施設が大きな被害を受け、大規模な断水につながっている。水道システムは、インフラ・ライフラインであるため、断水によって、国民生活や事業活動も甚大な被害を受ける。減断水被害は、渇水によっても毎年のように発生している。これらの影響に対して、様々な適応策が検討されている。全般的な対策として、水道システムの危害の特定とそのリスク評価、脆弱性評価（洪水リスクマップ、渇水リスクマップ等）がある。水質の場合、適応策の具体的内容は水質項目によって異なるが、水源での管理や浄水場での対応が挙げられた。水害や渇水については、応急給水体制等のソフト面の対応と、施設の設置や更新等のハード面の対応が挙げられた。これら適応策は、実際に取り組みが行われているが、今後は、気候変動影響を考慮した水道事業に関する計画や水安全計画の作成も重要であると考えられた。また、気候変動影響の評価を行う上で、対象項目の観測の継続や強化、将来予測データの活用が望まれる。

キーワード：気候変動、水道システム、水質、水害、渇水

Abstract

Water supply systems are affected in various ways by climate change, in terms of water quality, quantity, and facilities. The effects on water quality include taste and odor problems due to algae growth, increased concentrations of disinfection byproducts due to increased concentrations of their precursors, high turbidity due to flooding, and salt contamination in raw water due to salt water run-ups. In recent years, heavy rainfall and typhoon-related flooding have caused extensive damage to water supply facilities, leading to large-scale water outages. As the water supply systems represent infrastructure lifelines, water cut-offs result in serious damage to the lives and business activities of people. In addition, droughts have also caused water cutoffs every year. A variety of adaptations were applied to meet these effects. General adaptations include

連絡先：小坂浩司
〒351-0197 埼玉県和光市南2-3-6
2-3-6 Minami, Wako, Saitama 351-0197, Japan.
Tel: 048-458-6306
Fax: 048-458-6305
E-mail: kosaka.k.aa@niph.go.jp
[令和2年10月26日受理]

the identification of hazards to the water supply systems, risk assessment, and vulnerability assessment (e.g., flood risk maps and drought risk maps). In the case of water quality, although the adaptations that are applied depend upon the specific water quality issues, watershed management at the water source, as well as treatment at the water purification plant were mentioned. For floods and droughts, both intangible adaptations such as the emergency water supply systems and tangible adaptations, such as the installation and renewal of facilities were applied. While these adaptations have been implemented in practice, it is also important to develop a water supply management plan and a water safety plan that properly take the impacts of climate change into account. In order to assess these impacts, it is necessary to continuously monitor target items and work to achieve their enhancement, while utilizing predictive data on climate change.

keywords: climate change, water supply system, water quality, flood, drought

(accepted for publication, October 26, 2020)

I. はじめに

水道水は、ダムの水、湖沼水、河川水等の地表水や地下水を原水とし[1]、浄水場で処理された後、管路を通じて家庭へと届けられる。水道水は、蛇口から直接飲むことができる水質で[2]、飲み水以外にも、風呂、トイレ、炊事、洗濯等、様々な用途で使用されており[3]、水道システムは日常生活に必要な不可欠なライフラインである。家庭での一人一日あたりの使用水量は、東京都では平均219 L (2015年度) [4]と報告されている。また、水道水は、官公署、学校、病院、事務所用、営業で使用される業務・営業用水、工場で使用される工業用水等にも用いられており[1]、水道システムは事業活動にも重要な社会インフラであると言える。

気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の第5次報告書によると、気候変動は、ここ数十年、全ての大陸と海洋で、自然および人間システムに影響を与えている[5]。この中で、多くの地域において水文サイクルが変化し、淡水資源は量と質に影響を受けていると報告されている。水資源を利用している水道システムは、当然ながら同様の影響を受ける。気候変動による水資源への影響[6]として、豪雨や洪水、渇水の増加、水温の上昇、海面水位の上昇等が挙げられている。水道は社会インフラであるため、洪水等による水道施設の被害に加え、水道サービスの機能停止によって生じる影響についても考慮する必要がある[7]。気候変動影響評価報告書[7]では、気候変動による影響を7分野 (さらに、大・小項目に分類) について評価を行っているが、水道システムは複数の分野に関連している。この関連する複数の分野が、重大性が特に大きく、緊急性も高いと評価された小項目を含む分野に挙げられている。

このように、水道システムは気候変動影響が大きい分野であると考えられ、世界各国で様々な適応策が検討され、水道事業者による取り組みも行われている[8-11]。日本では、2018年6月に気候変動適応法[12]が制定、同年11月に気候変動適応計画[13]が閣議決定され、適応策への取り組みはより一層重要な課題となっている。本稿では、気候変動への水道システムへの影響とその適応策

について、これまでの知見を取りまとめた。

II. 気候変動による水道システムへの影響

気候変動による水道システムへの影響は多岐に亘る。ここでは、水質、水害、渇水に分類して紹介する。ただし、紹介する影響は、必ずしも気候変動に起因するものであるかが研究により明らかとなっていない。

1. 水質

図1に、水環境・水資源分野において気候変動により想定される影響の概略図を示す[6]。水環境・水資源分野は、気候変動適応計画[13]で分類されている7分野の一つである。降水量・降水パターンの変化、気温上昇にともなう海面水位の上昇、水温上昇等の気候・自然的要素の変化によって、水環境や水資源、すなわち、原水の水質や水量が影響を受ける。ここで、影響を受ける水質項目は多いが、その代表的な項目について紹介する。

水道水源であるダム・湖沼では、水温の上昇や水温躍層、栄養塩の負荷量の増加等によって、藻類が増加し、浄水場での生物障害の増加へとつながる[6,10,14]。藻類の増加は、全国の37ダムを対象とした気候変動モデルによっても推定されている[15]。藻類による主な生物障害として、マイクロシスチン等の藍藻毒や異臭味等が知られているが[10,15-17]、日本では、特に異臭味による被害が多い[16]。異臭味被害人口は、1990年の2000万人をピークに減少し、近年は、150~200万人程度で推移している[18]。一方、被害を受けた水道事業者数は120~130程度で漸増している。異臭味被害のうち、かび臭による被害が最も多く[16,17]、その代表であるジェオスミンおよび2-メチルイソボルネオールは、水道水質基準項目に指定されている[2]。2012年の青森県、2014年の大分県のように、これまで、かび臭原因物質が検出されなかった地域や、今まで起こっていなかったような規模での検出も報告されている[19,20]。青森県の事例では、異臭味発生直後から対策検討委員会が設置され、原因解明、導入した緊急対策の有効性の検証・評価、今後の恒久的な対策案の検討が行われた[19]。

気候変動影響に対する水道システムの適応策

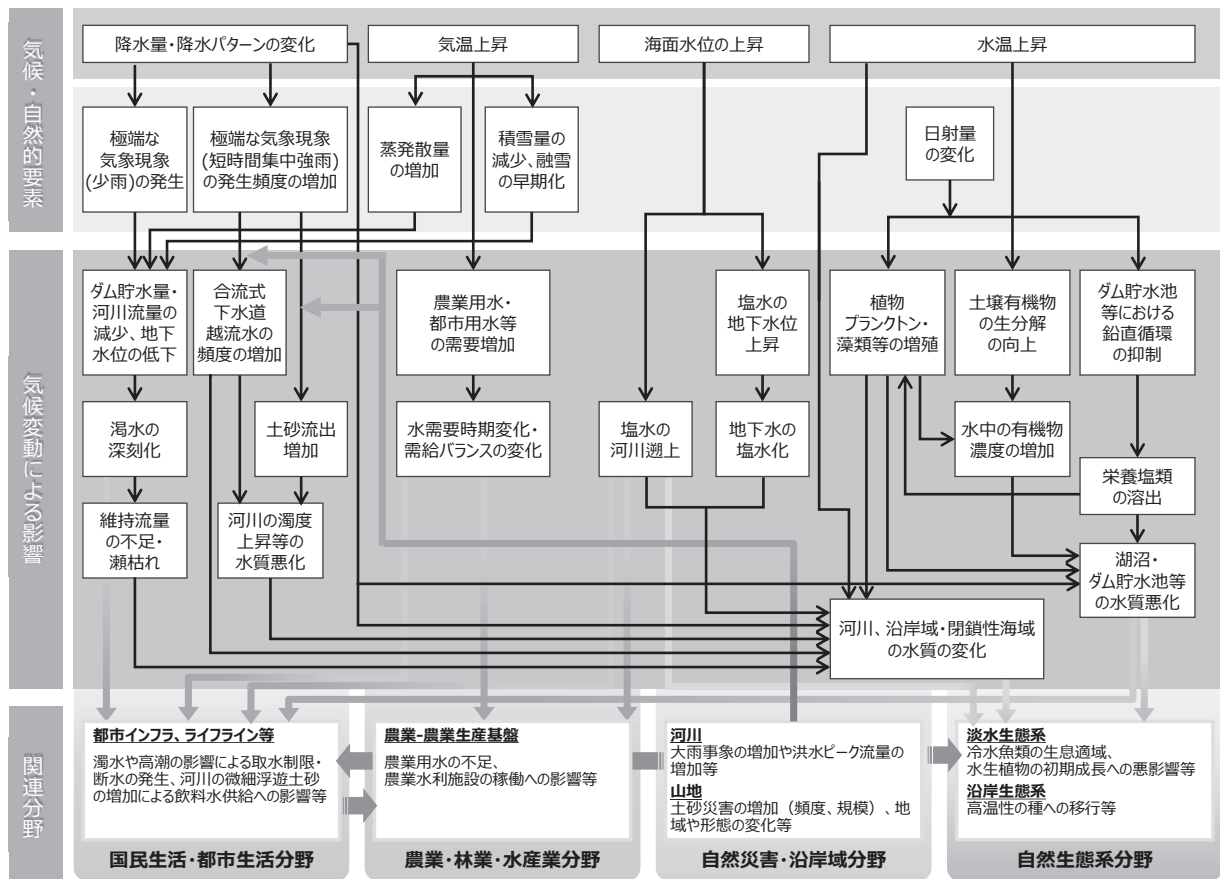


図1 気候変動により想定される影響の概略図（水環境・水資源分野） 文献[6]より転載

ダム・湖沼での藻類濃度の上昇は、水中の有機物濃度の増加にもつながる。水中の有機物濃度の上昇は、水温の上昇により土壌中の有機物の分解が促進されることによっても生じる[21]。これら有機物は、トリハロメタン等の消毒副生成物前駆物質となるため、水中の有機物濃度の上昇は、水道水中の消毒副生成物濃度の上昇に影響する。また、水温が高くなると、給配水システムでの残留塩素の減少速度も増加し、これにともなって塩素注入量も増えるため、その結果、水道水中の消毒副生成物濃度の増加にも影響すると推定されている[10,22,23]。

集中豪雨や降雨パターンの変化、それにともなう洪水は水道原水の水質に影響をおよぼす。土壌の浸食や堆積物の巻き上げ等により河川の濁度が上昇し、原水中の濁度が1000度を超える場合もある[24]。濁度が貯水池に流入し、長期に亘り水道原水が高濁度であったとの報告もある[25]。また、堆積物の巻き上げ等によって病原微生物や農薬等の化学物質の濃度が上昇する場合もある[10,26,27]。合流式下水道では、降雨により下水が未処理のまま越流水として放流される場合もあるため、降雨パターンの変化で越流水の頻度が増加すると、病原微生物や化学物質濃度に影響をおよぼす可能性がある[10,28]。

沿岸域、河口域の浄水場では、地下水が原水の場合、

台風等にともなう高潮等によって海面水位の上昇が起こり、帯水層に塩水が浸入し、塩分濃度が増加する[10]。河川が原水の場合も、高潮が発生しすることで、塩水遡上が起こり、原水中の塩分濃度が増加したことが報告されている[29,30]。塩分濃度は、味や塩化物イオン濃度に影響する。塩分濃度の増加にともなって臭化物イオン濃度も増加するため、塩素処理により、臭素系消毒副生成物濃度も増加する[30]。塩水遡上は、渇水にともなう河川流量の低下によっても起こる[31,32]。

渇水時には、貯水池の水量の低下によって希釈効果の下がるため、底泥から溶出する金属類（マンガン等）濃度の上昇につながる[10]。同様に、河川流量や地下水の流入量が減少するため、河川水中の化学物質（農薬等）濃度や地下水中の地質由来の化学物質（ヒ素、フッ素等）濃度が上昇する可能性がある[10]。

原水水質が悪化した場合、水質項目に応じた浄水処理の強化によって対応が取られる[10,24]。例えば、かび臭原因物質への粉末活性炭の注入、高濁度原水への凝集剤の注入量の増加である。この結果、浄水薬品使用量、浄水汚泥や廃棄物量が増加するため、コストの増加といった影響が生じる[17]。

表1 2015~2019年度における主な大雨, 台風災害[16,32-34]

発生時期	災害名称等	断水戸数	最大断水日数
2015年9月	関東・東北豪雨(茨城県, 栃木県, 福島県, 宮城県)	約2.7万	11
2016年8月中旬	台風9・11号(北海道, 茨城県)	約1.7万	7
2016年8月下旬	台風10号(北海道, 岩手県等)	約1.7万	40
2017年10月下旬	台風21号(茨城県, 千葉県等)	約1.1万	5
2018年7月上旬	平成30年7月豪雨(広島県, 愛媛県, 岡山県等)	約26.3万	38*
2018年9月上旬	台風第21号(京都府, 大阪府等)	約1.6万**	12
2018年9月下旬	台風第24号(静岡県, 宮崎県等)	約2.0万**	19
2019年9月上旬	房総半島台風(千葉県, 東京都, 静岡県)	約14.0万	17
2019年10月中旬	東日本台風(宮城県, 福島県, 茨城県, 栃木県等)	約16.8万	33

* 家屋等損壊地域を除く

** 断水戸数が多いのは停電による短時間の断水が発生したため



図2 2019年東日本台風による水道の被災状況(上:浄水場の冠水, 下:浄水場の取水口流出) 文献[16]を転載

2. 水害

近年, 豪雨や台風による水害で, 数多くの水道施設等が大きな被害を受けている。表1に, 2015~2019年度における主な大雨, 台風災害の事例を, 図2に, 2019年東日本台風による水道の被災状況を示す[18,33-35]。近年, 毎年, 1万戸以上の断水被害が発生している。断水被害の原因は, 送電線鉄塔や電柱の倒壊にともなう大規模な停電, 浄水場等の冠水, 土砂崩れや配水管の破損等による水道施設の被害等である。2018年7月豪雨では, 広島県, 岡山県, 愛媛県等, 18府県80市町村の111水道事業体で26万4千戸に断水被害が発生した[33]。この断水は, 最大8月13日まで続いた。さらに, 台風等の災害は, 水道施設への直接的な被害だけでなく, 水道システムを含むインフラ・ライフラインの途絶によって, 国民生活や事業活動に甚大な影響をおよぼす[6]。

3. 渇水

ダム建設等の水資源開発, 水源の多様化, 管路の漏水抑制等により, 断水をともなうような深刻な渇水被害は減少してきたが, 毎年のように給水制限等をともなう渇水が発生している[36]。一方, 気候変動にともなう降水パターンの変化や積雪量の減少, 早期化等で[6], 渇水が頻発化, 長期化, 深刻化し, さらなる渇水被害の激甚化が懸念されている。2008年, 渇水による被害で, 全国の0ダムで取水制限が行われ, 144万人が影響を受けた[17]。また, 2018年度は減圧給水または夜間断水が3事例, 2019年度は減圧給水が5事例報告された[37]。

III. 水道システムでの適応策

1. 危害とリスク評価および脆弱性評価

気候変動影響の内容や受けやすさは水道システムによって異なる。水道事業体は, 水道システムについて気候変動による危害とそのリスク評価, および気候変動の影響に対する脆弱性評価を行う[10,11,38]。国内では, 東京都水道局は, 気候変動による水道事業への影響を評価し, 自然災害, 渇水, 水質悪化の点から取り組みを行っている[39]。

危害へのリスク評価の手法の一つに, ダウンスケールの気候変動モデルにより将来予測を行い, 結果の不確かさについて十分理解しつつ, 対象地域の評価を行う方法がある[11]。この場合, 通常, 異なる起源の情報やモデルを併用して行う。自然災害の脆弱性評価として, 洪水リスクマップや渇水リスクマップ等の作成も行われている[11,40]。

水安全計画は, 世界保健機関(WHO)により提唱された, 水源から蛇口に至る各段階で危害を抽出し, リスク評価を行う統合的な水質管理システムである[41]。現在, 世界各国の水道事業体で, 水安全計画は水質管理に活用されている[42]。日本の場合, 厚生労働省は, 水安全計画策定ガイドラインを公表し[43], 水安全計画の策定, またはこれに準じた危害管理の徹底を推奨している

[44]. WHOは、気候変動への対応として、気候変動に耐性のある水安全計画の策定マニュアルを公表した[10]. 国外の水道事業者では、気候変動の影響について、水安全計画に組み込んでいる事例もある[10].

全国の水道事業者について、影響の受けやすさと対応力を組み合わせた複合評価指標を用い、気候変動への適応力の評価も行われた[45]. この結果、適応力は地域や規模で違いがあるが、特に規模が小さい水道事業は適応力に違いがあることが示された.

2. 水質

気候変動によって影響を受ける水質項目の場合、適応策は原因となる事象と水質項目によって異なる. 豪雨にともなう濁度上昇の場合、水源での対応として、農地や都市の雨水からの堆積物負荷の低減、浸出を低減するための流床と堤防の設置、栄養塩を保持するために主要な集水域に湿地を設置等がある[10]. 浄水場での対応の場合、急速ろ過システムの浄水場を対象とした高濁度原水への対応の手引き[24]では、濁度の値によってレベル分けを行い、対応方法として、監視強化、凝集沈殿の強化、取水制限、取水停止等を示している.

ダム・貯水池における藍藻類やそれにとまなう藍藻毒、かび臭原因物質への適応策の場合、栄養塩負荷の削減、栄養塩を保持する湿地や河岸緩衝地帯の設置、ダムでの選択取水、水温躍層の低減や栄養塩を酸化するための曝気循環設備の設置、藍藻類が問題となる濃度以下を維持するよう殺藻剤の添加等をはじめ、水源での対応が数多く挙げられている[10]. 気候変動モデルを用いた研究では、曝気循環設備の導入により、将来的な影響人口や浄水場での高度浄水プロセスの導入費用が低減されることを推定した[15]. また、かび臭原因物質を産生する藍藻類について、遺伝子解析を用いた判別手法も検討されている[46]. 浄水場での対応方法は、殺藻にとまなう藍藻毒やかび臭原因物質の放出抑制のための塩素の注入地点変更、藍藻毒の分解のためのろ過後の塩素処理の強化、藻類除去のための凝集とろ過の最適化等がある[10]. 藍藻毒やかび臭原因物質の処理性能向上のため、オゾン処理、粉末活性炭処理、粒状活性炭処理等の適用も挙げられる[10].

水道水中の消毒副生成物濃度の上昇への適応策の場合、消毒副生成物前駆物質への対応として、水源での消毒副生成物前駆物質の濃度上昇の抑制（上述の水源での藍藻類対策等）と浄水場での除去（凝集強化、前塩素処理の中間塩素処理への変更、オゾン処理等の高度浄水プロセスの導入等）がある[10,47]. 配水システムでの消毒副生成物濃度の上昇を抑制するため、消毒剤の種類の変更、塩素濃度の低減化、追加塩素による塩素濃度の平準化等がある.

塩水遡上等によって原水に塩水が混入した場合、通常の浄水処理方式では塩分の除去は困難である. このため、電気伝導度計の設置による原水中の塩濃度上昇の早期検

知、沿岸の地下水レベルの監視、河川等による希釈流の維持、他の水源の水との混合による希釈、水門等の塩水の浸入防護壁の設置、取水制限、取水停止等、原水への塩水の混入防止が中心となる[11,29].

3. 水害

豪雨や台風等にとまなう水害による水道システムへの影響（水質を除く）への適応策のうち、厚生労働省は風水害対策マニュアル策定指針[48]を公表し、水道事業者にその策定を促している. 2017年度末での策定率は、40.0%である[49]. 具体的な内容は、応急給水や応急復旧体制および発生時の対応方法の整備となる. 加えて、災害発生時を想定した応急給水訓練も重要である. 高潮発生による取水施設への海水混入の防止と、混入原水の系外への排出に対する訓練も行われている[11,29]. 個人レベルの適応策として、断水時に備えた飲料水の備蓄もある [3日分（1人1日3Lが目安）] [50]. ハード面の対策として、ダムや堤防等の設置、貯水池の運用の最適化、水道施設の計画的な更新、水害等の自然災害にも耐えられる耐震管への更新が挙げられる[11,39,48,49]. それ以外に、自家発電設備の新設・増強、バックアップ機能として広域的な送水管ネットワークの構築もある.

2018年7月の豪雨災害等を踏まえ、厚生労働省は、全国の水道事業者（上水道等）を対象に、重要度の高い水道施設の災害対応状況について緊急点検を実施した. その結果、対策が必要な施設に、自家発電設備の設置等の停電対策、土砂流入防止壁の設置等の土砂災害対策、電

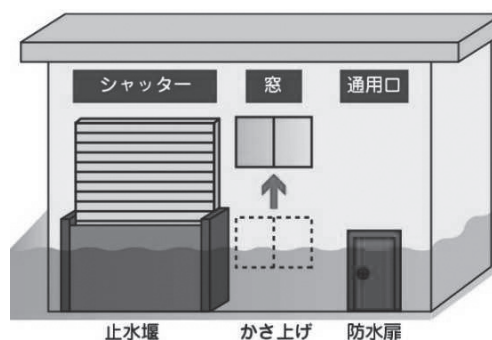


図3 水道施設の緊急点検を踏まえた災害対策の例（上：浸水災害対策のイメージ、下：配水池の耐震化工事）文献[33]より転載

気設備の高所移設, 防水設備 (防水壁, 防水パネル, 防水扉) の設置等の浸水対策, 耐震補強等の地震対策, 基幹管路の耐震化ペースの加速といった緊急対策を行った (図3) [33].

4. 渇水

渇水による水道システムへの影響 (水質を除く) への適応策として, 厚生労働省は渇水対策マニュアル策定指針[36]を公表しており, 水道事業体に対しその作成を促している。2017年度末での策定率は, 43.1%である[49]. 事前対策として渇水時体制組織の準備や水道施設の渇水対策 (緊急水源の確保, 水の有効利用等) が, 渇水時対策として渇水時体制の確立, 渇水時対策支援, 給水制限, 応急給水等がある[36]. また, 国土交通省は, 渇水シナリオと, 対応策等を時系列で整理した行動計画によって構成される, 渇水タイムラインの作成を促進しており, そのガイドラインを公表している[51]. 渇水タイムラインは渇水関係機関の連携のもと作成する。

水の効率的利用や水需要管理による対策として, 水量の再配分, 水道メーター設置による見える化, 節水機器の導入, 節水意識の向上等, また, 貯水による対策として貯水池や多目的ダムの設置, 水道水源林の保全, 土壌の水分保持や水分蒸発の低減に関する技術等がある [11,39,52]. さらに, 代替水源の確保, 雨水・再生水の利用, 人工降雨装置の設置等も報告されている。

IV. おわりに

水道システムは, 気候変動影響によって, 水質, 水量および水道施設に対して様々な影響を受けると考えられる。さらに, 水道システムは, インフラ・ライフラインであるため, 断水によって水道システムの機能が停止すると, 国民生活や事業活動が甚大な影響を受ける。これら気候変動影響に対し, 多くの適応策が検討され, 実際に取り組みされているものもある。今後は, 水道事業に関する計画や水安全計画等についても, 気候変動による影響を考慮して作成していくことが重要であると考えられる。

一方, 気候変動による影響であるかどうかは明らかになっていない場合もある。気候変動影響を計画等に反映させる上で, 対象項目の継続的なモニタリングやその強化が求められる。また, 気候変動の予測データについても, 水道事業体を利用しやすい形で情報提供されることが望まれる。

利益相反

利益相反無し

参考文献

- [1] (公社) 日本水道協会. 平成29年度水道統計施設・業務編. 東京: (公社) 日本水道協会; 2019. Japan Water Works Association (JWWA). [Statistics of Water Supply, FY 2017.] Tokyo: JWWA; 2019. (in Japanese)
- [2] 厚生労働省. 水質基準項目と基準値 (51項目). <https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/topics/bukyoku/kenkou/suido/kijun/kijunchi.html> (accessed 2020-10-25) Ministry of Health, Labour and Welfare. [Suishitsu kijun komoku to kijunchi (51 komoku).] <https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/topics/bukyoku/kenkou/suido/kijun/kijunchi.html> (in Japanese) (accessed 2020-10-25)
- [3] 東京都水道局. くらしと水道 水の上手な使い方. <https://www.waterworks.metro.tokyo.jp/kurashi/shiyou/jouzu.html> (accessed 2020-10-25) Bureau of Waterworks Tokyo Metropolitan Government. [Kurashi to suido mizu no jozu na tsukaikata.] <https://www.waterworks.metro.tokyo.jp/kurashi/shiyou/jouzu.html> (in Japanese) (accessed 2020-10-25)
- [4] 東京都水道局. よくある質問 もっと知りたい「水道」のこと. <https://www.waterworks.metro.tokyo.jp/faq/qa-14.html#2> (accessed 2020-10-25) Bureau of Waterworks Tokyo Metropolitan Government. [Yokuaru shitsumon motto shiritai 'suido'no koto.] <https://www.waterworks.metro.tokyo.jp/faq/qa-14.html#2> (in Japanese) (accessed 2020-10-25)
- [5] 環境省, 翻訳. 気候変動 2014: 影響, 適応及び脆弱性気候変動に関する政府間パネル第5次評価報告書 第2作業部会報告書 政策決定者向け要約 技術要約. 2014. Ministry of Environment (Translation). [Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability – IPCC WGII AR5 summary for policymakers.] 2014. (in Japanese)
- [6] 環境省中央環境審議会地球環境部会気候変動影響評価等小委員会. 気候変動影響評価報告書 (詳細). 2020. Climate Change Impact Assessment Subcommittee, Global Environment Committee, Central Environment Council, Ministry of the Environment. [Kiko hendo eikyo hyoka hokokusho (shosai).] 2020. (in Japanese)
- [7] 環境省中央環境審議会地球環境部会気候変動影響評価等小委員会. 気候変動影響評価報告書. 2015. Climate Change Impact Assessment Subcommittee, Global Environment Committee, Central Environment Council, Ministry of the Environment. [Kiko hendo eikyo hyoka hokokusho] 2015. (in Japanese)

- [8] International Water Association. Climate Change. <https://iwa-network.org/climate-change/> (accessed 2020-10-25)
- [9] United States Environmental Protection Agency (US EPA). Adaptation actions for water utilities. <https://www.epa.gov/arc-x/adaptation-actions-water-utilities> (accessed 2020-10-25)
- [10] WHO. Climate-resilient water safety plans managing health risks associated with climate variability and Change. Geneva: WHO Press; 2017.
- [11] UN Environment-DHI Centre on Water and Environment, the Climate Technology Centre and Network, UNEP DTU Partnership. Climate change adaptation technologies for water: A practitioner's guide to adaptation technologies for increased water sector resilience. 2017.
- [12] 環境省. 気候変動適応法. 2018. Ministry of the Environment. [Climate change adaptation Act.] 2018. (in Japanese)
- [13] 環境省. 気候変動適応計画. 2018. Ministry of the Environment. [Climate change adaptation Plan.] 2018. (in Japanese)
- [14] US EPA. Harmful algal blooms. <https://www.epa.gov/nutrientpollution/harmful-algal-blooms> (accessed 2020-10-25)
- [15] 川本圭彦, 梅田信, 大山秀格, 小池亮, 森本達男, 小熊久美子, 他. 気候変動が水道水源ダムの水質に与える影響と水道事業における適応力の評価. 土木学会論文集G (環境). 2015;71(5):I_117-I_126. Kawamoto Y, Umeda M, Ooyama H, Koike M, Morimoto T, Oguma K, et al. [Evaluation of the impact of climate change on water quality in dam reservoirs for drinking water and the adaptation capacity of water utilities.] Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. G (Environmental Research) 2015;71(5):I_117-I_126. (in Japanese)
- [16] Kishida N, Sagehashi M, Takanashi H, Fujimoto N, Akiba M. Nationwide survey of organism-related off-flavor problems in Japanese drinking water treatment plants (2010–2012). Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA. 2015;64:832-838.
- [17] 秋葉道宏, 山田俊郎, 中村怜奈, 小坂浩司, 浅見真理. 水源水質の変動と健康リスク. 環境システム計測制御学会誌. 2010;15(1):16-19. Akiba M, Yamada T, Nakamura R, Kosaka K, Asami M. [Change of water source quality due to climate change and its health risk.] Journal of EICA. 2010;15(1):16-19. (in Japanese)
- [18] 厚生労働省. 令和元年度全国水道関係担当者会議資料. 2020. Ministry of Health, Labour and Welfare. [Reiwa gannendo zenkoku suido kankei tantosha kaigi shiryo.] 2020. (in Japanese)
- [19] 国土交通省東北地方整備局岩木川ダム統合管理事務所. 浅瀬石川ダム水質保全対策検討委員会. <http://www.thr.mlit.go.jp/tugaru/environment/suisituhozenn/suisituhozenn.html> (accessed 2020-10-25) Iwaki River Dam Integrated Control Office, Tohoku Regional Development Bureau, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism. [Asaseishikawa dam suishitsu hozen taisaku kento iinkai.] <http://www.thr.mlit.go.jp/tugaru/environment/suisituhozenn/suisituhozenn.html> (in Japanese) (accessed 2020-10-25)
- [20] 高橋威一郎, 馬見塚守, 高橋博幸, 一万田圭一, 久知良啓三, 岐津英明. 大分川水系において発生したかび臭障害への対応. 日本水処理生物学会誌. 2016;52(4):105-111. Takahashi T, Mamizuka M, Takahashi H, Ichimanda K, Kuchira K, Kizu H. [Countermeasures against musty-odor problems occurred in the Oita river basin] Japanese Journal of Water Treatment Biology. 2016;52(4):105-111. (in Japanese)
- [21] Lipczynska-Kochany E. Effect of climate change on humic substances and associated impacts on the quality of surface water and groundwater: A review. Science of The Total Environment. 2018;640–641:1548-1565.
- [22] Valdivia-Garcia M, Weir P, Graham DW, Werner D. Predicted impact of climate change on trihalomethanes formation in drinking water treatment. Scientific Reports. 2019;9(1):9967.
- [23] Cool G, Delpla I, Gagnon P, Lebel A, Sadiq R, Rodriguez MJ. Climate change and drinking water quality: Predicting high trihalomethane occurrence in water utilities supplied by surface water. Environmental Modelling & Software. 2019;120:104479.
- [24] (公財) 水道技術研究センター. 高濁度原水への対応の手引き. 2014. Japan Water Research Center. [Kodakudo gensui eno taio no tebiki] 2014. (in Japanese)
- [25] 山崎公子, 村山道彦, 小泉明, 横山勝英, 青木秀幸, 岩本智江. 小河内貯水池における大雨時流入濁質による高濁度化現象の要因分析. 土木学会論文集G (環境). 2012;68:III_259-III_268. Yamazaki K, Murayama M, Koizumi A, Yokoyama K, Aoki H, Iwamoto T. [Factor analysis of high turbidity phenomenon in Ogouchi reservoir caused by the suspended matter inflow during heavy rain.] Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. G (Environmental Research) 2012;68:III_259-III_268. (in Japanese)
- [26] Kishida N, Morita H, Haramoto E, Asami M, Akiba M. One-year weekly survey of noroviruses and enteric adenoviruses in the Tone River water in Tokyo metro-

- opolitan area, Japan. *Water Research*. 2012;46(9):2905-2910.
- [27] 佐藤学, 上村仁, 小坂浩司, 浅見真理, 鎌田素之. 神奈川県相模川流域における河川水及び水道水のネオニコチノイド系農薬等の実態調査. *水環境学会誌*. 2016;39(5):153-162.
Sato M, Uemura H, Kosaka K, Asami M, Kamata M. [Survey of pesticide concentrations, including neonicotinoids, in the Sagami river, its tributaries and tap water.] *Journal of Japan Society on Water Environment*. 2016;39(5):153-162. (in Japanese)
- [28] Hata A, Katayama H, Kojima K, Sano S, Kasuga I, Kitajima M, Furumai H. Effects of rainfall events on the occurrence and detection efficiency of viruses in river water impacted by combined sewer overflows. *Science of the Total Environment*. 2014;468:757-763.
- [29] 小林正継, 本莊浩良, 三原正和. 高潮による取水施設への海水混入時の対応 (I) —取水一時停止を伴う影響回避の対応経過—. 令和元年度全国会議 (水道研究発表会). 2019. 同抄録集. p.938-939.
Kobayashi M, Honzyo H, Mihara M. [Takashio ni yoru shusui shisetsu eno kaisui konnyuji no taio (I) shusui ichiji teishi o tomonau eikyo kaihi no taio keika.] *Annual Research Conference of JWVA in FY 2019*. 2019. Abstract. p.938-939. (in Japanese)
- [30] 片木孝徳, 永木正洋, 鯛谷将司. 高潮による取水施設への海水混入時の対応 (II) —海水混入に伴う取水原水の水質実態調査—. 令和元年度全国会議 (水道研究発表会). 2019. 同抄録集. p.940-941.
Katagi T, Nagaki M, Taitani M. [Takashio ni yoru shusui shisetu eno kaisui konnyuji no taio (II) kaisui konnyu ni tomonau shusui gensui no suishitsu jittai chosa.] *Annual Research Conference of JWVA in FY 2019*. 2019. Abstract. p.940-941. (in Japanese)
- [31] 国土交通省北陸地方整備局信濃川下流河川事務所, 新潟市水道局. 信濃川水門の一部を閉鎖します～信濃川取水塔の塩水遡上に対応～. 記者発表資料. 2018.
Shinano River Downstream River Office, Hokuriku Regional Development Bureau, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Niigata City Water Supply Bureau. [Shinanogawa suimon no ichibu o heisa shimasu Shinanogawa shusuito no ensui sojo ni taio.] *Kisha happyo shiryō*. 2018. (in Japanese)
- [32] 増井一貴, 高橋直, 岡村直樹, 渡辺琢. 阿賀野川浄水場における塩水遡上対応. 令和元年度全国会議 (水道研究発表会). 2019. 同抄録集. p.942-943.
Masui K, Takahashi N, Okabayashi N, Watanabe T. [Aganogawa josuiji ni okeru ensui sojo taio.] *Annual Research Conference of JWVA in FY 2019*. 2019. Abstract. p.942-943. (in Japanese)
- [33] 厚生労働省. 平成30年度全国水道関係担当者会議資料. 2019.
Ministry of Health, Labour and Welfare. [Heisei 30 nendo zenkoku suido kankei tantosha kaigi shiryō.] 2019. (in Japanese)
- [34] 厚生労働省. 平成29年度全国水道関係担当者会議資料. 2018.
Ministry of Health, Labour and Welfare. [Heisei 29 nendo zenkoku suido kankei tantosha kaigi shiryō.] 2018. (in Japanese)
- [35] 厚生労働省. 平成28年度全国水道関係担当者会議資料. 2017.
Ministry of Health, Labour and Welfare. [Heisei 28 nendo zenkoku suidokankei tantosha kaigi shiryō.] 2017. (in Japanese)
- [36] 厚生労働省. 湯水対策マニュアル策定指針 (令和2年7月改訂). 2007. <https://www.mhlw.go.jp/content/10900000/000656432.pdf> (accessed 2020-10-25)
Ministry of Health, Labour and Welfare. [Kassui taisaku manuaru sakutei shishin (Reiwa 2 nen 7 gatsu kaitei).] 2007. <https://www.mhlw.go.jp/content/10900000/000656432.pdf> (in Japanese) (accessed 2020-10-25)
- [37] 厚生労働省. 湯水に伴う給水制限情報. <https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/topics/bukyoku/kenkou/suido/kikikanri/dangensui.html> (accessed 2020-10-25)
Ministry of Health, Labour and Welfare. [Kassui ni tomonau kyusui seigen johō.] <https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/topics/bukyoku/kenkou/suido/kikikanri/dangensui.html> (in Japanese) (accessed 2020-10-25)
- [38] Van Abs DJ. Climate change adaptation in the water supply sector. 2016. <https://njadapt.rutgers.edu/docman-lister/conference-materials/166-climate-change-adaptation-in-water-supply-sector-final-1/file> (accessed 2020-10-25)
- [39] 東京都水道局. 東京都水道局環境5か年計画2020～2024. 2020.
Bureau of Waterworks Tokyo Metropolitan Government. [Tokyo Suidokyoku kankyo 5 kanen keikaku 2020-2024.] 2020. (in Japanese)
- [40] 吉川泰代, 矢部博康, 小池亮, 森本達男, 小熊久美子, 荒巻俊也, 他. 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. *土木学会論文集G*. 2012;68(7):III_147-III_156.
Yoshikawa Y, Yabe H, Koike M, Morimoto T, Oguma K, Aramaki T, et al. [Assessment of impacts of natural disasters on water supply utilities using hazard maps.] *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. G (Environmental Research)* 2012;68(7):III_147-III_156. (in Japanese)

- [41] 国包章一, 遠藤卓郎, 西村哲治監訳. WHO 飲料水水質ガイドライン (第3版) 第1巻. 東京: (社) 日本水道協会; 2008.
Kunikane S, Endo T, Nishimura T (Supervisor of translation). [Guidelines for drinking-water quality, 3rd edition: Volume 1.] Tokyo: JWVA; 2008. (in Japanese)
- [42] Bartram J, Corrales L, Davison A, Deere D, Drury D, Gordon B, Howard G, Rinehold A, Stevens M. Water safety plan manual: Step-by-step risk management for drinking-water suppliers. Geneva: WHO Press; 2009.
- [43] 厚生労働省. 水安全計画策定ガイドライン. 2009. Ministry of Health, Labour and Welfare. [Mizu anzen keikaku sakutei gaidorain.] 2009. (in Japanese)
- [44] 厚生労働省. 「水安全計画策定ガイドライン」の送付について (平成20年5月30日健水発第0530001号). 2009. Ministry of Health, Labour and Welfare. [‘Mizu anzen keikaku sakutei gaidorain’ no sofū ni tsuite (Heisei 20 nen 5 gatsu 30 nichi kensuihatsu dai 0530001 go).] 2009. (in Japanese)
- [45] 大山秀格, 川本圭彦, 小池亮, 森本達男, 小熊久美子, 荒巻俊也, 他. 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. 土木学会論文集G(環境). 2014;70(7):III_131-III_140.
Ooyama H, Kawamoto Y, Koike M, Morimoto T, Oguma K, Aramaki T et al. [Assessment of adaptation capacity to climate change using management indicators for water utilities.] Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. G (Environmental Research) 2014;70(7):III_131-III_140. (in Japanese)
- [46] 秋葉道宏, 藤本尚志, 浅田安廣, 江崎敦. カビ臭原因物質藍藻類のライブラリー構築へ向けた全国水道水源での存在実態調査. 厚生労働科学研究費補助金健康安全・危機管理対策総合研究事業「水道事業の流域連携の推進に伴う水供給システムにおける生物障害対策の強化に関する研究」(研究代表者: 秋葉道宏. H30-健危-一般-004) 令和元年度総括・分担研究報告書. 2020.
Akiba M, Fujimoto N, Asada Y, Ezaki A. [Kabishu genin busshitsu ransorui no library kochiku ni muketa zenkoku suido suigen deno sonzai jittai chosa.] Health and Labour Sciences Research Grant, Kenko anzen/Kikikan-ri taisaku sogo kenkyu jigyo [Suidojigyo no ryuiki renkei no suishin ni tomonau mizu kyokyu shisutemu ni okeru seibutsu shogai taisaku no kyoka ni kansuru kenkyu (H30-Kenki-Ippan-004)] Heisei 30 nendo Sokatsu/Buntan kenkyu hokokusho. 2020. (in Japanese)
- [47] 伊藤禎彦, 越後信哉. 水の消毒副生成物. 東京: 技報堂出版; 2008.
Itoh S, Echigo S. [Mizu no shodoku fukuseiseibutsu] Tokyo: Gihodo Shuppan; 2018. (in Japanese)
- [48] 厚生労働省. 風水害対策マニュアル策定指針. <https://www.mhlw.go.jp/file/06-Seisakujouhou-10900000-Kenkoukyoku/0000165018.pdf> (accessed 2020-10-25)
Ministry of Health, Labour and Welfare. [Fusuigai taisaku manuaru sakutei shishin.] <https://www.mhlw.go.jp/file/06-Seisakujouhou-10900000-Kenkoukyoku/0000165018.pdf> (in Japanese) (accessed 2020-10-25)
- [49] 気候変動適応推進会議. <別添資料1>平成30年度に実施した施策のフォローアップ個票. 気候変動適応計画の平成30年度施策フォローアップ報告書. 2019.
Promotion Council for Climate Change Adaptation. [Betten shiryō 1, heisei 30 nendo ni jissshi shita sesaku no fuoro appu kohyo.]FY 2019 Follow-up Report of Climate Change Adaptation Plan. 2019. (in Japanese)
- [50] 首相官邸. 災害に対するご家庭での備え～これだけは準備しておこう!～. <https://www.kantei.go.jp/jp/headline/bousai/sonae.html> (accessed 2020-10-25)
Prime Minister’s Official Residence. [Saigai ni kansuru gokatei deno sonae: koredake wa junbi shite oko.] <https://www.kantei.go.jp/jp/headline/bousai/sonae.html> (in Japanese) (accessed 2020-10-25)
- [51] 国土交通省. 渇水対応タイムライン作成のためのガイドライン (初版). 2019. <https://www.mlit.go.jp/common/001281452.pdf> (accessed 2020-10-25)
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism. [Kassui taisaku taimu rain sakusei no tame no gaidorain (shohan).] 2019. <https://www.mlit.go.jp/common/001281452.pdf> (in Japanese) (accessed 2020-10-25)
- [52] 内閣府政府広報室. 節水に関する特別世論調査. 2010. Government Public Relations, Cabinet Office. [Sessui ni kansuru tokubetsu yoron chosa.] 2010. (in Japanese)