

研究成果の刊行物・別刷

[総説]

気候変動が水道システムに与える影響に関する文献調査

Literature Review of Climate Change Impacts on the Water Supply

中村 怜奈* 山田 俊郎** 秋葉 道宏*

気候変動が水道システムに与える影響、および、水道における気候変動への対応策に関して28年間の国内文献の調査を行なった。調査は、水道システムに関する気候変動の論文または総説を対象とし、文献検索データベースJDream IIを使用した。気候変動による影響を、気象および水文の変化、水源への影響、浄水処理への影響、給配水への影響、水の利用者への影響の5種類に分類した。また、気候変動への対応策を、緩和策と適応策に分類し、さらに適応策を施策的取組みと技術的取組みに分けた。気候変動による影響および対応策は、一般的事例として報告されているものが多く、気象、水文、水源に比べ、浄水処理、給配水、利用者への影響に関するものが少ない結果となった。今後は、これまでの水道における自然災害や水質事故の事例を、気候変動の影響という観点から見直し、具体的かつ定量的な影響評価を行ない、対応策を講じていくことが必要である。

Key words : 文献調査, 気候変動, 水道システム, 水源管理, 緩和策, 適応策

1. はじめに

世界的な課題となっている気候変動は、その影響の多くが水を通して表われる¹⁾とされており、水道システムにもその影響が及ぶことが懸念されている。

その一方で、水道システムは多くの電気・機械設備を有することから、エネルギーに依存する産業といえる。平成18年度に日本の水道事業から排出された温室効果ガスは、CO₂換算でおよそ340万tであり²⁾、同年に国内で排出された温室効果ガス(同13億3,600万t³⁾)の0.25%を占める。水道

* Reina NAKAMURA, Michihiro AKIBA, 国立保健医療科学院水道工学部 〒351-0197 埼玉県和光市南2-3-6, Department of Water Supply Engineering, National Institute of Public Health, 2-3-6 Minami, Wako-shi, Saitama-ken 351-0197 Japan (E-mail : nakamura@niph.go.jp)

** Toshiro YAMADA, 岐阜大学工学部社会基盤工学科

事業における気候変動への対応策は、一部の事業体において温室効果ガス削減の取組みが行なわれているが、国内全体では事業体の規模により取組みの状況が異なる³⁾。

将来にわたって水道システムを適切に維持管理していくためには、気候変動を水道システムに対するリスクとして捉え、水道システムへの影響を把握し、その影響を回避あるいは低減していく対応策を講じていくことが求められる。そこで、気候変動によってもたらされる水道システムへの具体的な影響や、水道における今後の気候変動への対応策に関する国内の文献調査を行ない、わが国における水道分野での気候変動に関連する既往の知見を整理し、研究の動向および今後の課題を明らかにした。ここで、気候変動が日本の水道システムに与える影響と対応策を整理するさい、文献として入手が容易であり、調査結果を日本の水道システムに対して反映しやすい国内文献を調査対象とした。また、日本列島は南北に長く、多様な気候であることから、日本における気候変動の影響および対応策が、ある程度、海外においても適用可能であると考えた。

2. 方法

文献調査の対象として、国内で発行された水道または水環境に関連する主要な学術雑誌17誌を抽出し、表1に示す。これらの雑誌に1981年1月から2009年9月に収録された、水道システムに関連する気候変動の論文または総説(以下、文献)を検索した。

検索には、(独)科学技術振興機構が運営するJDream II (JST文献検索サービス)およびJ-STAGE(科学技術情報発信・流通総合システム)、大学共同利用機関法人情報・システム研究機構国立情報学研究所が運営するCiNii(国立情報学研究所論文情報ナビゲータ)を用いた。JDream IIは書誌の検索データベースであり、科学技術、医薬学に関する国内外の文献約5,100万件を収録している。J-STAGEは、国内外の科学技術情報関連の文献を検索するシステムの総称である。CiNiiは、国内の学術論文の検索データベースであり、約1,000誌の雑誌論文約280万件を収録している。

表1 文献調査の対象とした雑誌

雑誌名	(発行元)
環境科学会誌	(独)環境科学会
環境工学研究論文集	(独)土木学会環境工学委員会
水工学論文集	(独)土木学会
水道	(全国簡易水道協議会)
水道技術ジャーナル	(独)水道技術研究センター
水道協会雑誌	(独)日本水道協会
水道公論	(独)日本水道新聞社
水文・水資源学会誌	(水文・水資源学会)
土木学会誌	(独)土木学会
土木学会論文集	(独)土木学会
土木学会論文集B	(独)土木学会
土木学会論文集G	(独)土木学会
水環境学会誌	(独)日本水環境学会
用水と廃水	(独)産業界水調査会
陸水学雑誌	(日本陸水学会)
全国水道研究発表会講演集	(独)日本水道協会
日本水環境学会年会講演集	(独)日本水環境学会

検索データベースにおいて「(気候または気象)および(変動または変化)および(検索語句)」という検索条件に対して、文献の要旨、内容が合致するものを検索した。ここで、各検索データベースでは、検索条件「または」に対して論理積を用いた検索を行ない、「および」に対して論理和を用いた検索を行なうと定義している。検索語句は、渇水、洪水、水害、濁水という気候変動によって起こる現象に関する語句群と、飲料水、水温、水源、水質、水道、水量、地下水、水、水環境、水資源という気候変動によって影響を受ける対象に関する語句群を入力した。参考として、「検索語句」になにも入力しない場合も検索を行なった。

3. 結果および考察

検索の結果、書誌検索データベースJDream IIの検索結果に、他の検索データベースの検索結果がすべて含まれたため、以降の結果についてはすべてJDream IIを用いた調査の結果を示す。表2に、JDream IIによる文献検索の結果を示す。

検索語句をなにも入力しない場合、すなわち「気候変動」という検索条件で925件の国内文献が抽出された。「気候変動および水」という検索条

表2 検索データベースJDream II を用いた文献
検索の結果

検索語句	抽出された 文献数	検索語句	抽出された 文献数
(なし)*	925	洪水	58
水	735	水環境	44
水量	275	水源	25
水質	223	濁水	25
水道	80	水害	12
地下水	77	濁水	3
水温	68	飲料水	1
水資源	64		

* 検索語句を入力せずに検索した場合を表わす

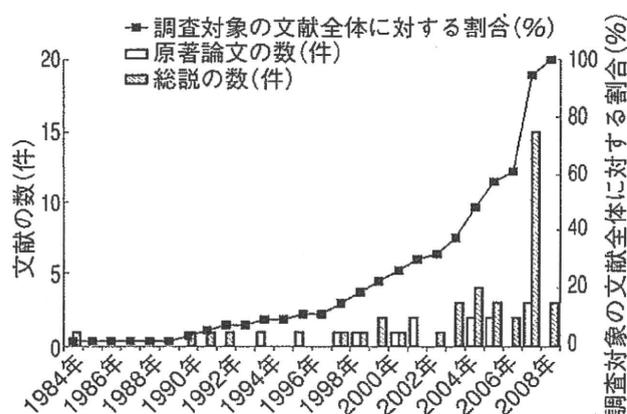


図1 文献調査により抽出した文献数

件で735件、「気候変動および水道」では80件の国内文献が抽出された。それらの抄録等から内容を判断した結果、水道システムに関する気候変動の文献として54件の国内文献を抽出し、これらの内容を精査した。なお、54件のうち原著論文は14件、総説等は40件であった。

なお、参考として、同様の条件により海外文献を含めた文献検索を行なった結果、「気候変動および水道」という検索条件に対して398件の文献が抽出された。

図1に、調査対象の文献が発表された年と、各年の文献件数が54件全体に占める割合を示した。ただし、2009年は9月までの結果である。水道システムに関連する気候変動の文献は、1980年代よりみられるようになり、年々その件数は増加している。

3.1 気候変動による水道システムへの影響

表3に、気候変動による水道システムへの影響を示す。54件の文献内容から気候変動による影響を、水道システムの観点に基づき影響が及ぶ対象別に、①気象および水文の変化、②水源への影響、③浄水処理への影響、④給配水への影響、⑤利用者への影響、に分類した。分類方法は環境省地球温暖化影響・適応研究委員会報告書第2部第3章「水環境・水資源分野」¹¹⁾を参考とした。なお1件の文献中に複数の事例が含まれるため、事例数は文献数と異なる。

図2に、気候変動による気象・水文の変化と、それに伴う水道システムおよび水の利用者への影響を示す。本図は、平井ら⁵⁾によって示された気候変動の影響要因関連図を参考とした。ここでは対象ごとに、その内容について述べる。

3.1.1 気象および水文の変化

気象および水文の変化に関する内容は、54件の文献中13種類169事例あった^{61)~52)}。そのうち降水量の変化に関連する内容が68事例と最も多く、年降水量の変動幅が増大し降水パターンが変化すること(20事例；以下、括弧内の数字は同様に事例数とする)、豪雨の発生頻度が増加すること(19)、降水量が増加すること(15)、降雪量が減少すること(10)、無降雨日数が増加すること(4)、の順であった。降水量の変化に次いで、気温の上昇とそれに伴う変化が58事例報告されていた。その内容として、海面が上昇すること(13)、水温または地下水温が上昇すること(11)、地表または海面からの蒸発散量が増加すること(9)、ブナ林の分布適地が消失すること(1)、の順であった。降水量の変化に関連して、洪水の危険性が増大することや、濁水の発生回数が増加するといった、水害の発生頻度の増加が2種類20事例報告されていた。その他、河川流出量が減少することが12事例報告されていた。

海面の上昇および水害の発生頻度の増加に関して、自然災害により水道システムが被害を受け、水の供給に支障をきたす事例が発生している。以下に、その一例を示す。

1) 台風による浄水場の浸水

2005年9月、宮崎県において台風14号に伴

表3 気候変動による気象・水文の変化とそれに伴う水道システムおよび水の利用者への影響

対象	内容
①気象および水文(169)	<ul style="list-style-type: none"> ・降水量の変化(68) (内訳) 降水パターンの変化(20), 豪雨回数の増加(19), 降水量の増加(15), 降雪量の減少(10), 無降雨日数の増加(4) ・気温の上昇とそれに伴う変化(58) (内訳) 気温の上昇(35), 海面の上昇(13), 水温または地下水温の上昇(11), 地表または海面からの蒸発散量の増加(9), プナ林の分布適地の消失(1) ・水害の増加(20) (内訳) 洪水リスクの増大(13), 濁水の発生回数の増加(7) ・河川流出量の減少(12)
②水源(98)	<ul style="list-style-type: none"> ・湖沼水質の変化(39) (内訳) 藻類の大量増殖(12), 栄養塩の溶出(10), かび臭原因物質の増加(5), アオコおよび淡水赤潮の発生回数の増加(4), 異臭味の発生回数の増加(3), 有毒アオコの発生リスクの増大(3), 重金属の溶出リスクの増大(2) ・水量の減少(28) (内訳) 濁水リスクの増大(20), 融雪水量の減少(7), 地下水位の低下(1) ・濁質の流入(11) (内訳) 濁度の上昇(8), SS濃度の上昇(3) ・その他の水質に関する変化(20) (内訳) 溶存酸素濃度の低下(8), 地下水の塩水化または塩水の遡上(5), BODの上昇(3), pHの上昇(2), 農薬汚染リスクの増大(2)
③浄水処理(6)	薬品使用量の増加(2), ろ過障害(2), 排水処理への負担の増加(1), 有効塩素濃度の低下(1)
④給配水(3)	配水量の増加(2), 配水量の増加に伴う濁水発生頻度の増加(1)
⑤利用者(6)	病原微生物汚染リスクの増大(3), 水系感染症リスクの増大(3)

注) 括弧内の数字は事例数を表わす

い3日間の総降雨量がおおよそ2,000mmとなる大雨が観測された。この雨で浄水場付近の河川が氾濫、浄水場が冠水し、浄水処理が不可能となり断水となった⁵³⁾。

2) 集中豪雨による濁水の発生

2007年6月、北海道北見市で時間降水量50mmの集中豪雨が発生した。この雨で河川表流水を原水とする浄水場において、原水濁度が15,000度を記録し、取水停止となり市内全域が断水となった⁵⁴⁾。

3) 高波による塩水被害

2008年2月、富山県において発生した高波は人的・物的被害をもたらした。この海水が飲用井戸へ流入し、22世帯で高い塩分濃度により飲用ができない状態が3カ月以上続いた⁵⁵⁾。

4) 集中豪雨による浄水場の浸水

2009年7月、山口県で集中豪雨により浄水場が浸水、浄水処理が不可能となり、市内の全給水戸数の約半数に当たるおおよそ35,000戸が最長10日間断水となった⁵⁶⁾⁵⁷⁾。

5) 集中豪雨による水道管の破損

2009年7月、長崎県で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、おおよそ17,500戸が最長5日間断水となった⁵⁸⁾。

以上、豪雨や洪水の発生回数が増加するとの報告に対しては、水道施設の浸水被害や水道原水濁度の上昇に注意し、海面が上昇するとの報告に対しては、高波による水道施設への被害や井戸水の塩水化に注意する必要があると考えられた。

3.1.2 水源への影響

水道の水源への影響に関連する内容は17種類98事例あり^{7)~11)13)~15)18)19)21)~24)26)30)35)~38)40)41)43)44)48)~52)}、

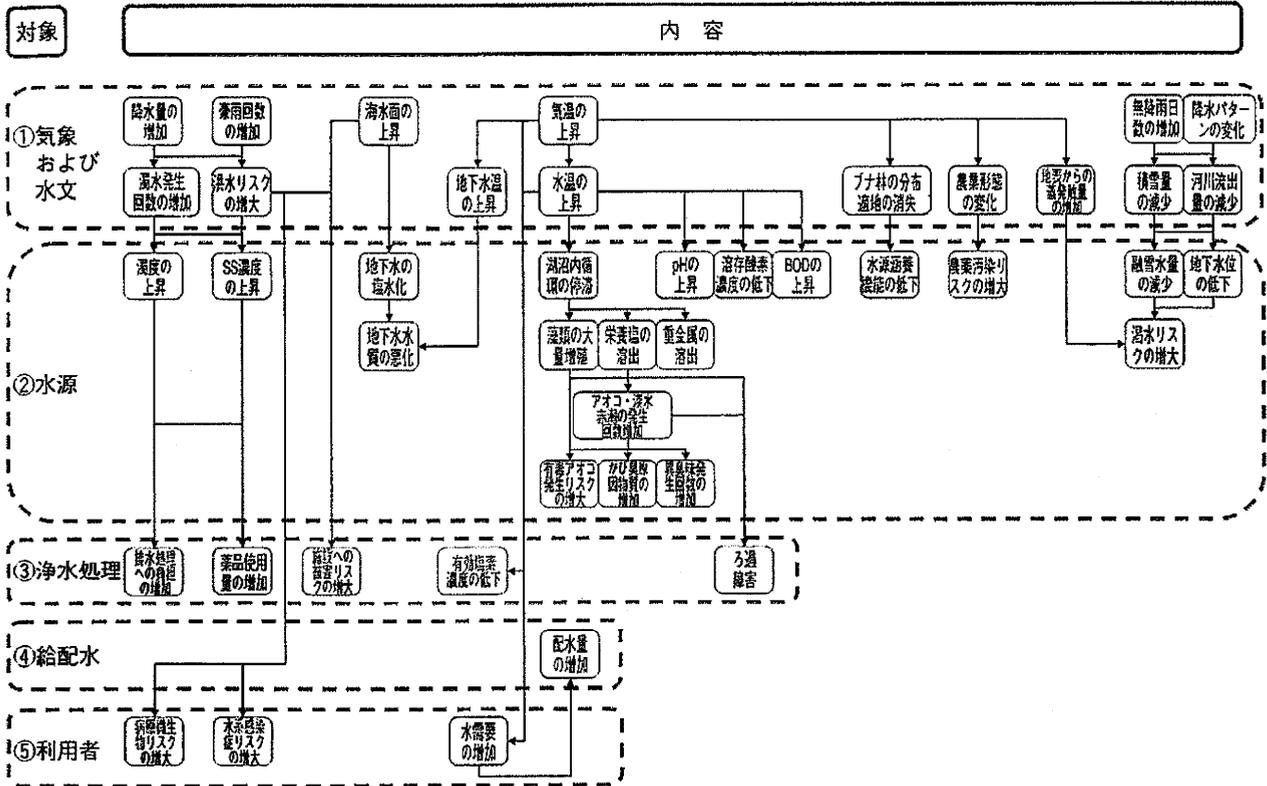


図2 気候変動による気象・水文の変化とそれに伴う水道システムおよび水の利用者への影響

おもに湖沼水質に関する内容と水源水量に関する内容が、全体の7割を占めた。湖沼水質の変化に関するものは7種類39事例あり、栄養塩濃度が増加することに伴い藻類が大量に増殖すること(12)や、湖底から栄養塩が溶出すること(10)、かび臭原因物質が増加すること(5)、アオコや淡水赤潮の発生回数が増加すること(4)、異臭味の発生回数が増加すること(3)、有毒アオコの発生リスクが増大すること(3)、湖底からの重金属の溶出リスクが増大すること(2)、であった。かび臭や異臭味といった、水道水質への直接的な影響は合計8事例報告されていた。水源水量の変化に関する内容は3種類28事例あり、濁水のリスクが増大すること(20)、融雪水量が減少することによりダム貯水量が減少すること(7)、地下水水位が低下すること(1)、であった。豪雨回数の増加に関連して、水道原水濁度の上昇やSS濃度の上昇といった水源への濁質の流入に関する内容が2種類11事例あった。海面の上昇に関連する内容として、地下帯水層が塩水化するとともに感潮河川からの塩水が浸入する可能性がある⁹⁾ことから、地下水の塩水

化または塩水の遡上が2種類5事例報告されていた。気温の上昇に伴って、農作物の栽培適地が変化する他、病害虫が北上する可能性があることから、農薬による水源の汚染のリスクが高まるとする報告が2事例あった。その他の水源への影響として、水中の溶存酸素濃度の低下(8)、BODの上昇(3)、pHの上昇(2)、があった。

3.1.3 浄水処理への影響

浄水処理への影響に関する事例は4種類6事例あった²⁴⁾²⁶⁾³⁶⁾⁵⁹⁾。降水量の増加に関連した内容として、豪雨回数の増加に伴う浄水処理薬品使用量の増加(2)や、その結果、発生汚泥量が増加し、排水処理過程の負担が増加すること(1)、があった。また、気温の上昇に関連して、水温の上昇に伴い藻類が大量に発生し、ろ過障害が起こること(2)や、貯蔵温度が上昇すると次亜塩素酸ナトリウムの有効塩素濃度が低下すること(1)、が報告されていた。以上は、すべて総説のなかで一般的な事例として示されたものであり、今後の課題として、それらの内容についてさらに具体的かつ定量的な検討が必要であると考えられる。

3.1.4 給配水への影響

給配水への影響は、配水量の増加に関する内容が2種類3事例あり¹⁰⁾²³⁾²⁴⁾、水需要の増大に伴い配水量が増加すること(2)、都市の配水量が増加する夏季に渇水の発生頻度が増加すること(1)、があった。

3.1.5 利用者への影響

水の利用者への影響に関する内容として、豪雨発生回数の増加および洪水のリスクの増大に伴い、病原微生物汚染事故や水系感染症のリスクが高まることが、2種類6事例¹⁰⁾²⁴⁾³⁶⁾⁴⁰⁾⁴⁶⁾報告されていた。

3.2 水道システムにおける気候変動への対応策

54件の文献内容から、水道分野における気候変動への対応策の事例を緩和策と適応策に分類し、表4に示す。以下に、緩和策および適応策の内容について述べる。

3.2.1 緩和策に関連する取組み

緩和策に関連する取組みとして、7種類51事例あった^{9)11)16)17)19)20)23)~26)34)37)~39)}。そのうち温室効果ガスの排出量を削減する取組みが44事例あり、直接的に温室効果ガスの排出量を削減する取組みとして、省エネルギーを推進すること(13)、小規模水力発電や太陽光発電など新エネルギーを導入すること(11)、水道施設の省電力を推進すること(7)、

送配水ポンプを省電力化すること(6)、の5種類が報告されていた。また、二酸化炭素の固定によって間接的に温室効果ガスを削減する取組みとして、水源涵養林の保全による温室効果ガスの森林への吸収について7事例紹介されていた。渇水のリスクが高まることへの対応策として、節水をすること(4)、が示されていた。その他、水の輸送にかかわるエネルギーやコストを削減するため、漏水率を低下させること(3)、があった。

3.2.2 適応策に関連する取組み

適応策に関連する取組みは、18種類56事例あった^{6)11)~13)16)18)19)21)~23)27)28)30)33)~37)40)41)60)}。うち施策的な取組みは34事例であり、水道事業者、河川管理者、民間企業などの水に関係する機関の連携を推進すること(8)、現在の水需要に応じて水利権を見直すといった水利用形態の見直し(6)、取水地点を変更すること(5)、ダム等の水資源をマネジメントすること(4)、水害等の災害時のハザードマップ作りまたは避難システムの確立(3)、水需要予測手法の見直し(3)、地球環境と共生し持続的な経済発展をするといった持続可能な社会づくり(2)、水道原水の相互融通(2)、水害等の災害からの復興を支援するシステムの設置(1)、の9種類が述べられていた。技術的な取組みは22事例であり、気候変動に関する調査研究の推進または気候変動に関する知見を共有すること(6)、気候変

表4 水道における気候変動への対応策

対応策	内容
緩和策(51)	<ul style="list-style-type: none"> ・温室効果ガスの削減(44) (内訳) 省エネルギーの推進(13)、新エネルギーの導入(11)、省電力の推進(7)、ポンプの省電力化(6)、水源涵養林の整備(7) ・その他(7) (内訳) 節水(4)、漏水率の低下(3)
適応策(56)	<ul style="list-style-type: none"> ・施策的な取組み(34) (内訳) 関係機関の連携(8)、水利用形態の見直し(6)、取水地点の変更(5)、水資源のマネジメント(4)、災害時におけるハザードマップの整備・避難システムの確立(3)、水需要予測手法の見直し(3)、持続可能な社会づくり(2)、原水の相互融通(2)、災害復興支援システムの設置(1) ・技術的な取組み(22) (内訳) 調査研究の推進または知見の共有(6)、将来予測の信頼性の向上(3)、施設の整備・維持管理(3)、下水再生水の利用(3)、高度処理の導入(2)、海水の淡水化(2)、水の循環利用(1)、水利用システムの再構築(1)、水工施設群の操作の高度化(1)

注) 括弧内の数字は事例数を表わす

動の将来予測の精度を向上させること(3)、自然災害に対応できるよう水道施設を整備・維持管理すること(3)、再生水の利用を促進すること(3)、原水水質の変化に対応するため高度浄水処理の導入を促進すること(2)、海水の淡水化(2)、水の循環利用(1)、水利用システムの再構築(1)、水工施設群の操作の高度化(1)、の9種類が示されていた。

3.3 水道事業体における取組み

文献調査の結果、気候変動に対する取組みは、一般的対応策として提案されているものが多くを占めた。一方、一部の水道事業体は、独自に数値目標を設定し気候変動に対する取組みを進めている。以下に主要都市における取組みの一例を示す。

1) 東京都水道局

東京都は「カーボンマイナス東京10年プロジェクト」⁶¹⁾において、2020年までに東京の温室効果ガス排出量を2000年比で25%削減するとしている。これを受け東京都水道局は、「東京都水道局環境計画2010-2012」⁶²⁾において、2010年度から2012年度の3年間で合計6,000tのCO₂の排出を抑制するとしている。また、同期間で、局保有施設における再生可能エネルギーの発電規模を7,800kW以上にするとしている。

2) 横浜市水道局

「横浜市水道事業中期経営計画(平成21年度～23年度)」⁶³⁾において、平成23年度までに太陽光・水力発電等の新エネルギーの発電規模を、現状のおよそ2倍の1,948kWにするとしている。また、市民ボランティアとの協働により、45haの水源涵養林を整備するとしている。

3) 大阪市水道局

「大阪市水道・ランドデザイン」⁶⁴⁾において、水力発電設備を市内6個所の浄水場に設置する計画を進めている。また、浄水過程で発生する汚泥を園芸用土とすることで、汚泥の有効利用率を100%にすることを目標としている。

水道事業体における実際の取組みは、新エネルギーによる発電の導入、水源涵養林の整備など、

文献調査結果の緩和策に関連する取組みの内容とおおむね一致した。数値目標を設定している事業体では、より具体性のある取組みとなっている。

4. まとめ

気候変動が水道システムに与える影響、および水道における気候変動への対応策に関して、28年間の国内文献の調査を行なった結果、原著論文14件、総説40件の合計54件の文献を抽出した。

気候変動の影響を、気象および水文の変化、水源への影響、浄水処理への影響、給配水への影響、水の利用者への影響の5種類に分類し、事例数はそれぞれ169事例、98事例、6事例、3事例、6事例あった。気象および水文の変化は、おもに降水量の変化が報告されており、水源への影響は、湖沼水質に関する内容と水源水量に関する内容が全体の7割を占めた。

気候変動への対応策を、緩和策と適応策に分類し、さらに、適応策を施策的取組みと技術的取組みに分けた。緩和策は51事例あり、おもに直接的な温室効果ガス削減の取組みが示されていた。適応策は56事例あり、施策、技術ともに中長期的な取組みを中心として提案されていた。

今回調査した気候変動の水道システムへの影響と対応策に関して、文献中で一般的な事例および対応策として報告されているものが多くを占めた。また、気候変動による影響の事例は、浄水処理、給配水、利用者への影響に関する内容が少なかった。

わが国の水道は、長い歴史のなかで多くの自然災害や水質事故を経験しており、その事例および対応策が、気候変動の影響に対しても有用であると考えられる。今後は、これまでの水道における自然災害や水質事故の事例を、気候変動の影響という観点から見直し、具体的かつ定量的な影響評価を行ない、対応策を講じていくことが必要である。また、山間部の小規模水道は、比較的水質の良好な水源に依存する事業体が多く、気候変動による水源水質および水源水量の変化に対し脆弱であることが予想される。今後、これらの小規模水道における気候変動の影響と対応策について検討するとともに、海外の動向についても調査を行な

う予定である。

なお、本調査は厚生労働省科学研究費補助金を受けて実施した調査研究の一部であることを付記する。

—参考文献—

- 1) 環境省、文部科学省、気象庁：温暖化の観測・予測および影響評価統合レポート「日本の気候変動とその影響」、2009年10月 (<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/rep091009/full.pdf>) (2009)。
- 2) 厚生労働省健康局水道課：水道事業における環境対策の手引書(改訂版)、2009年7月 (<http://www.mhlw.go.jp/za/0723/c02/c02-02.html>) (2009)。
- 3) 財団法人環境研究センター温室効果ガスインベントリオフィス(GIO)、環境省地球環境局地球温暖化対策課：日本国温室効果ガスインベントリ報告書(NIR) 2010年4月版 (http://www-gio.nies.go.jp/aboutghg/nir/2010/NIR_JPN_2010_v3.0J.pdf) (2010)。
- 4) 環境省：第2部第3章 水環境・水資源分野、気候変動への賢い適応—地球温暖化影響・適応研究委員会報告書—、2008年6月 (<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/rceff-adp/report/part1.pdf>) (2008)。
- 5) 平井真砂郎、小棚木修、竹村雅之：水道システムは気候変動にどう対応するのか、水循環 貯留と浸透、71、28~34(2009)。
- 6) 原田 新、中田典秀、山下尚之、佐藤修之、伊藤光明、鈴木 稔、田中宏明、古米弘明：全国河川水質分布との相対比較による都市再生水の水質評価、環境工学研究論文集、43、501~508(2006)。
- 7) 川越清樹、菊地 裕、風間 聡、滝沢 智：気候変動による主要河川の水質の影響評価、環境工学研究論文集、45、467~474(2008)。
- 8) 花木啓祐：地球温暖化問題を考慮した水環境管理、水環境学会誌、29(2)57~61(2006)。
- 9) 古米弘明：水源としての水環境 水道水源の保全と流域圏の管理、水環境学会誌、28(5)290~295(2005)。
- 10) 脇岡靖明、高橋 潔、松岡 謙、原沢英夫：地球温暖化による水系感染症への影響、水環境学会誌、25(11)647~652(2002)。
- 11) 神野健二、広城吉成：地球温暖化と地下水塩水化、水環境学会誌、29(2)72~76(2006)。
- 12) 滝沢 智：欧州・米国における水資源保護の先進事例、水環境学会誌、28(5)305~309(2005)。
- 13) 田中宏明：気候変動に備える新たな水資源、水環境学会誌、31(3)119(2008)。
- 14) 渡辺義公：日本における水資源・水環境の持続性について、水環境学会誌、31(4)1~6(2008)。
- 15) 福島武彦、上西弘晃、松重一夫、原沢英夫：浅い富栄養湖の水質に及ぼす気象の影響、水環境学会誌、21(3)180~187(1998)。
- 16) 宮崎正信：水道事業における地球温暖化対策、水道、52(5)2~6(2007)。
- 17) 国土交通省土地・水資源局：平成15年度版水資源白書概要、日本の水資源—地球規模の気候変動と日本の水資源問題—、水道、48(11)29~38(2003)。
- 18) 国土交通省土地・水資源局：平成17年度版水資源白書概要、日本の水資源—気候変動が水資源に与える影響—、水道、50(10)1~11(2005)。
- 19) 山村尊房：最近の環境問題と環境行政の取り組み—水道に関係したいくつかの新しい課題—、水道、36(6)1~9(1991)。
- 20) 林 秀樹：横浜市における環境にやさしい水道システムの取り組みと水道水の有効利用について、設備システム・事業計画シリーズ(74)、水道技術ジャーナル、48、10~14(2008)。
- 21) 園田豊実：降水量に関する一考察、水道協会雑誌、53(4)58~60(1984)。
- 22) 栗原和夫、大垣真一郎：第4回IWAワークショップ「気候変動が水道事業に与える影響と適応」(その2)、水道協会雑誌、78(9)92~103(2009)。
- 23) 山村尊房：地球温暖化問題の動向と水道との係わり、水道協会雑誌、59(7)16~23(1990)。
- 24) 須藤隆一、山村尊房、粕谷明博、杉浦則夫、長岡敏和、藤井秀男：気候変動と水道、水道協会雑誌、77(8)39~75(2008)。
- 25) 清水雄二、牛窪俊之、佐々木弘、小幡 靖：横浜市水道局における「環境・エネルギー対策の強化」の取り組み、水道協会雑誌、74(8)30~35(2005)。
- 26) 遠藤尚志、内田晴敏、与田博恭：影響面から見た水道と地球環境問題、水道公論、28(11)31~35(1992)。
- 27) 梶根 勇：健全な水循環を形成する地下水の役割と保全 地球温暖化の時代における地下水の役割、水道公論、34(4)28~30(1998)。
- 28) 落合博和、黒羽根康演：都市型水害対策のあり方と推進論、水道公論、38(4)46~55(2002)。
- 29) 佐山敬洋、立川康人、寶 馨、増田亜美加、鈴木琢也：地球温暖化が淀川流域の洪水と貯水池操作に及ぼす影響の評価、水文・水資源学会誌、21(4)296~313(2008)。
- 30) 小尻利治：世界水フォーラムとその将来(9)、気候変動の水資源への影響評価、水文・水資源学会誌、17(2)212~216(2004)。
- 31) 赤澤悠子、沼口 敦、江守正多：地球温暖化に伴う積雪量変化の地域的特性—モデルと観測データの比較—、水文・水資源学会誌、18(5)510~520(2005)。
- 32) 和田一範、川崎将生、富澤洋介、楠 昌司、栗原和夫：高解像度全球モデルおよび地域気候モデルを用いた地球温暖化にともなう洪水リスクの評価、水文・水資源学会誌、21(1)12~22(2008)。
- 33) 佐多直明、黒瀬博行、長谷部期子：水道事業と地球温暖化防止の両立のための最適化手法の検討、第58回全国水道研究発表会講演集、74~75(2007)。
- 34) 山村尊房：気候変動と水道について—水道としての展望—、第59回全国水道研究発表会講演集、682~685(2008)。
- 35) 須藤隆一：気候変動と水道—持続可能な社会の形成をめざして—、第59回全国水道研究発表会講演集、674~677(2008)。
- 36) 杉浦則夫：気候変動にともなう水道の生物とその対策技術、第59回全国水道研究発表会講演集、678~681(2008)。

- 37) 長岡敏和：気候変動が水道事業に与える影響と適応，第59回全国水道研究発表会講演集，691～697(2008)。
- 38) 藤井秀男：環境に配慮した仙台市の取り組み，第59回全国水道研究発表会講演集，698～702(2008)。
- 39) 藤岡雅弘：名古屋市における地球温暖化対策の現状と課題，第57回全国水道研究発表会講演集，40～41(2006)。
- 40) 粕谷明博：気候変動が水資源に及ぼす影響，第59回全国水道研究発表会講演集，686～690(2008)。
- 41) 中西 弘：21世紀の課題と提言，持続可能な地球社会の形成，及び水道と下水道のあり方，土木学会論文集，692/VII-21，1～11(2001)。
- 42) 尾崎則篤，福島武彦，原沢英夫，小尻利治，河嶋克典：異なる時間スケールの気温，降水量，及び日射量の変動が河川水温に及ぼす影響，土木学会論文集，678/VII-19，93～103(2001)。
- 43) 尾崎則篤，福島武彦，小野美由紀，原沢英夫：気象変動の河川水質に及ぼす影響に関する統計的研究，土木学会論文集，629/VII-12，97～109(1999)。
- 44) 和田一範，村瀬勝彦，富沢洋介：地球温暖化に伴う降雨特性の変化と洪水・濁水リスクの評価に関する研究，土木学会論文集，796/II-72，23～37(2005)。
- 45) 東 博紀，松浦知徳：日本における大雨の発生頻度とEl Niño監視海域における海面水温変動，土木学会論文集B，62(3)251～257(2006)。
- 46) Bari, M. D., Yeasmin, S., 川本伸一：気候変化が病原微生物と感染に与えるインパクト，日本食品科学工学会誌，55(6)264～269(2008)。
- 47) 滝沢 智，小熊久美子，伊藤くみ，村上道夫：地球温暖化に伴う水道原水水質の変化の推定方法に関する検討，第43回日本水環境学会年会講演集，12(2009)。
- 48) 尾崎則篤，福島武彦，小野美由紀，原沢英夫：気候変動が河川水質に及ぼす影響に関する統計的研究 全国の河川を対象とし季節毎の影響の違いを中心に，第33回日本水環境学会年会講演集，28(1999)。
- 49) 鈴木 穰，中村敏一：統計データによる河川水質の長期的変化傾向の評価，第43回日本水環境学会年会講演集，11(2009)。
- 50) 二宮勝幸：河川水質データの時系列解析—気象および社会因子による過去15年間の水質変化—，用水と廃水，36(2)107～114(1994)。
- 51) 小倉紀雄：地球温暖化と陸水環境 地球温暖化の陸水水質への影響，陸水学雑誌，61(1)59～63(2000)。
- 52) 森 和紀：地球温暖化と陸水環境 地球温暖化と陸水環境の変化—とくに河川の水文特性への影響を中心に，陸水学雑誌，61(1)51～58(2000)。
- 53) 広津鍊一：水道施設のリスク管理—宮崎市富吉浄水場の水没事故報告—，水道協会雑誌，76(8)31～37(2007)。
- 54) 海老江邦雄，伊藤陽司，早川 博，永禮英明：北見市水道水の断水に関する原因技術調査委員会報告書(要約)，平成19年8月3日(<http://www.city.kitami.lg.jp/310-06/dansuihokoku.pdf>) (2007)。
- 55) 56. 入善・高波被害 井戸から塩水，北日本新聞社ホームページ(<http://www.kitanippon.co.jp/contents/appear/11/521.html>) (2009)。
- 56) 山口豪雨で3万戸断水，日本水道新聞，平成21年7月23日付(2009)。
- 57) 梅雨末期の豪雨で浸水 榎野川の洪水で浄水池，ポンプ，補機類などが冠水—山口市朝田浄水場—，水道公論，45(8)70～77(2009)。
- 58) 1日に全域の給水再開へ—佐世保市，水道産業新聞，平成21年8月3日付(2009)。
- 59) 野本雅彦，黒木 隆，杉山 麗，川地利明，高橋靖：浄水施設における次亜塩素酸ナトリウム中の塩素酸等の実態調査，用水と廃水，49(11)962～968(2007)。
- 60) 中村健治：「気候変動による洪水と濁水への影響と対策—東アジアを中心として—」のセッション報告，水文・水資源学会誌，17(2)210～212(2004)。
- 61) 東京都：カーボンマイナス東京10年プロジェクト—施策化状況 2010—，2010(平成22)年3月(<http://www.metro.tokyo.jp/INET/KEIKAKU/2010/03/DATA/70k38100.pdf>) (2010)。
- 62) 東京都水道局：東京都水道局環境計画2010-2012—水をはぐくむ豊かな地球環境を次世代へ—(<http://www.waterworks.metro.tokyo.jp/water/torikumi/kankyoku/kankyokeikaku2010-2012pamphlet.pdf>) (2010)。
- 63) 横浜市水道局：横浜市水道事業中期経営計画(平成21年度～23年度)，平成21年1月(http://www.city.yokohama.jp/me/suidou/kyoku/suidoujigyo/plan/pdf/cyuuki-keiei_suidou/h21cyuuki-keiei-suidou.pdf) (2009)。
- 64) 大阪市水道局：第5章 地球環境戦略，大阪市水道・ランドデザイン(http://www.city.osaka.lg.jp/suido/cmsfiles/contents/0000022/22943/grand_d05.pdf) (2009)。

(原稿受付日；2010年 4月 3日)

(原稿受理日；2010年 4月28日)

〈特集〉

水源水質の変動と健康リスク

秋葉道宏¹⁾, 山田俊郎^{2)*}, 中村怜奈¹⁾, 小坂浩司¹⁾, 浅見真理^{1)*}¹⁾ 国立保健医療科学院水道工学部 (〒351-0197 埼玉県和光市2-3-6 *E-mail: asami@niph.go.jp)²⁾ 岐阜大学工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1番1 *E-mail: ymd@gifu-u.ac.jp)

概要

気候変動により水道システムは様々な影響を受ける可能性が考えられる。水源では、渇水、洪水、藻類・異臭味原因物質の増加、病原微生物汚染など、処理では水質悪化による影響、薬品量の増加、配水給水系では、ポンプへの負荷の増大や塩素不足などが考えられる。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・回避する対策を推進するため、過去の日本及び海外の水源水質の変化とその影響について、事例をまとめた。先進国において近年30年間で、飲料水によって健康被害が生じたとされる事例は少なくとも69件あり、その多くはノロウイルス、カンピロバクターなどによる食中毒やクリプトスポリジウム等の耐塩素性病原微生物による感染であり、およそ60万人の患者が発生している。これらの事例について、汚染の場所や原因及び浄水場での塩素消毒の有無などについての分類を行ったところ、原因としては、水源の汚染が51件(74%)と最も多く、水源の汚染の原因が大雨による濁水の流入であったものが少なくとも25件(36%)をしめており、うち、8件は雪解けの影響も受けていると見られた。特に消毒のみの処理施設や濁度の変動を受けやすい施設などでは、今後このような健康リスクの発生の予防策も重要と考えられた。

キーワード：水道、水源、水質、気候変動、濁度
原稿受付 2010.4.6

EICA: 15(1) 16-19

1. はじめに

世界的な気候変動の影響を受け、気温の上昇にともなう豪雨の頻発や、降雨量の変動、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及ぼすことが考えられている¹⁾。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する必要がある。本稿では、気候変動が水道システムに与える影響について、これまでの事故事例等を検討し、今後懸念される事項をまとめた。

2. 気候変動が水道システムに及ぼす影響

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、渇水をはじめとして、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。

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 Table 1 に示す。

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の増加の可能性が挙げられる。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、国内の一般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0.84℃から0.89℃上昇するとの報告がある²⁾。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³⁾。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

Table 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	濁水被害、洪水被害、藻類、臭い原因物質の増加、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、塩水化
処理系	水没による被害、水質悪化による処理施設への影響、浄水薬品使用量の増加、浄水汚泥や廃棄物の増加
配水系・給水系	水没による被害、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

類や量に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の増加は濁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⁴⁾。

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、洪水や濁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等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。

これらのうち、気候変動が具体的に水道水源水質に与える影響として濁水や藻類の増殖による水質悪化があり、うち水温上昇と藻類増殖による pH、クロロフィル a (CHL-a) の上昇、生物相の変化がいくつかの水源で確認されている。このうち気候変動によりその頻度が増すと考えられる大雨による出水に伴う濁水に関する事故については、最近では 7 件の報告がされている。この中には 5 万世帯に及ぶ断水を長期間強いられるという深刻な事例もあった。原水における異臭味被害については、ここ数年は 70 件程度で推移しているが、被害者人口は、300 万人程度とピーク時の 7 分の 1 程度に減少している。これは高度浄水処理の導入等による対応が進んできたことも大きく寄与している

と考えられる。

3. 大雨等による日本の水道システム被害事例

これまで日本において濁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。

3.1 濁水

近年、わが国において濁水が各地で発生し、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% となるほど深刻な濁水となり、124 日間の取水制限が行われる等大きな影響を受けた。

3.2 洪水

(1) 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 1,000 mm 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 18,500 世帯が断水となる被害が発生した⁷⁾。

(2) 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⁾。

(3) 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 17,500 戸が最長 5 日間断水となった⁹⁾。

3.3 濁水

(1) 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⁾。

(2) 平成 19 年 6 月、北海道北見市において、時間降水量 50 mm 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 58,000 世帯) が長時間断水となる大規模な被害が発生した¹¹⁾。

(3) 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。

3.4 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⁾。

4. 水道における健康被害の事例

ここまでは、気候変動が水道システムに及ぼす影響についてまとめた。ここでは、このような水道への影響と維持管理に起因する健康被害リスクについて述べる。主に感染症に関する事故事例を集めた“Safe Drinking Water”¹³⁾で先進国における飲料水による健康被害の状況が取りまとめられている。その事例の中から、大雨に起因する健康被害事例に関する例を Table 2 に示す。先進国において最近 30 年間で、飲料水によって健康被害が生じたとされる事例は少なくとも 69 件あり、その多くはノロウイルス、カンピロバクターなどによる食中毒やクリプトスポリジウム等の耐塩素性病原微生物による感染であり、およそ 60 万人の患者が発生している。

これらの事例について、汚染の場所や原因及び浄水場での塩素消毒の有無などについての分類を行ったところ、原因としては、水源の汚染が 51 件 (74%) と最も多く、水源の汚染の原因が大雨による濁水の流入であったものが少なくとも 25 件 (36%) をしめており、うち、8 件は雪解けの影響も受けられていると考えられた。このように、水道水源は大雨等による濁水により汚染

されやすいことが確認された。Table 2 に代表的な事例を示す。

これらの健康被害が起きた事例では塩素消毒のみを

Table 2 “Safe Drinking Water”¹³⁾中の大雨による水源汚染に起因する先進国健康被害例 (抜粋)

1978.6 アメリカバーモント州ベントン 原水：表流水 (予備水源：地下水) 処理：塩素のみ 原因：カンピロバクター 有症者：15 人、想定感染者数：3,000 人 入院：報告なし 大雨の後に塩素注入量を超えた下水処理場からの汚染水の流入により発生した。前年の秋に煮沸指示があった広範囲の細菌汚染は、ろ過がない設備に大雨による高濁度水が流入したことで残留塩素が無くなったために起こった。
1979.7~12 アメリカペンシルバニア州ブラッドフォード 原水：表流水 (貯水池から) 処理：塩素のみ 原因：ジアルジア 有症者：407 人 推定感染者数：2,900~3,500 人 大雨のためにジアルジアに対する処理が不十分。ジアルジアの処理に対する認識不足、老朽化した塩素注入設備。
1980.6 アメリカテキサス州ジョージタウン 原水：伏流水 処理：塩素のみ 原因：コクサッキーウイルス、A 型肝炎ウイルス 有症者：36 人 (A 型肝炎) 推定感染者数：~7,900 人 大雨により下水が漏れだし流入し原水が汚染された (バックアップが無く手動での塩素注入)。塩素の接触時間が短かった。
1987.1~2 アメリカジョージア州カールトン 原水：表流水 処理：凝集、砂ろ過、塩素 原因：クリプトスポリジウム 有症者：58 人 推定感染者数：13,000 人 大雨による下水の流出で原水がクリプトスポリジウムに汚染された。濁質除去が不十分であり、ろ過施設のある浄水からの最初のクリプトスポリジウムの大規模集団感染。塩素消毒も不十分であった。
1996.6 日本 埼玉県越生町 原水：表流水・伏流水 原因：クリプトスポリジウム 有症者：125 人 推定感染者数：9,100 人以上 濁水に続く豪雨により濁度上昇。凝集剤を注入していなかった。上流 400 m と 1,200 m に排水施設があった。
2000.5 カナダ オンタリオ州ウォーカー 原水：浅伏流水 処理：塩素処理のみ 死亡者：7 人 有症者：163 人 (O-157)、105 人 (カンピロバクター)、12 人 (両方) 推定感染者数：2,300 人 豪雨の後に肥料 (農地に散布された堆肥) で汚染された水が流入したが、その時の塩素消毒が不十分だった。

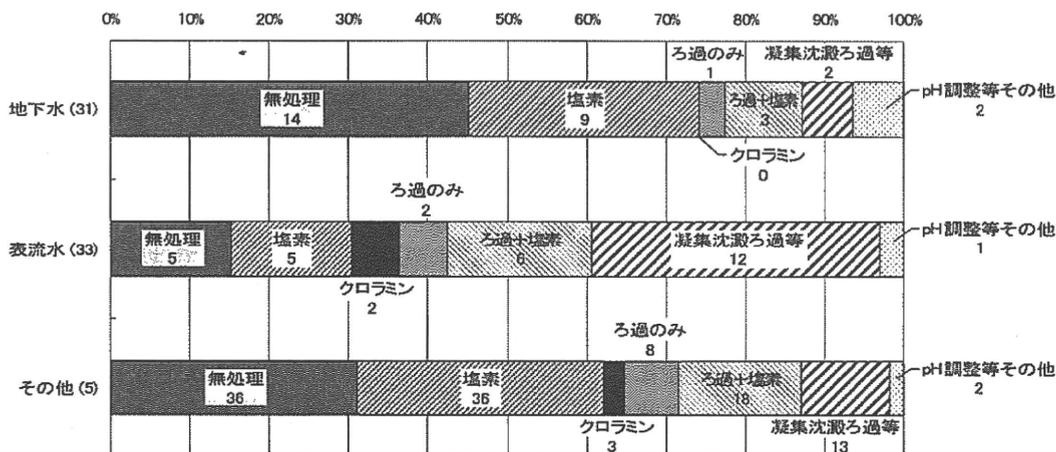


Figure 1 “Safe Drinking Water”¹³⁾で取り上げられている事故事例の原水とその処理方法 (単位：件)

行っているか全く処理を行っていない浄水場での割合が42件であり、簡易な浄水処理を行っているところでは汚染に対して弱く、健康被害につながりやすいと考えられた。また、塩素消毒が不足したことが原因となっているものが、19件あり、不十分な消毒が原因で健康被害を引き起こしたと考えられ、健康被害の発生と拡大防止には消毒などの微生物汚染対策が不可欠と言える。しかしながら、「ろ過」や「ろ過+塩素処理」、「凝集沈澱+ろ過等」の処理を行っている事例も27件あり、ろ過等の処理施設を備えているところでも、原水水質の急激な変動や処理の不備、処理能力を超えた場合には事故が起こることを示していると考えられた (Figure 1)。

多くの先進国で、水源が大雨による出水に伴う濁水で汚染され、健康被害が生じている事例が数多く報告されており、大雨による濁水リスクへの対策が重要であることが分かった。

5. ま と め

日本においても、飲料水危機管理実施要領に基づき大雨に伴う濁水による取水停止の事例が報告されており、健康を脅かす事例がある。集中豪雨や融雪により想定できない濁水の流入が起こることも懸念されており、先進国でも濁水による病原微生物の飲料水への混入による健康被害リスクや取水停止に伴う生活被害リスクがあることが確認できた。今後、このような水質の急激な変動への適応策を考えることが、飲料水による健康被害を低減化する上でも重要であると考えられた。

謝 辞

本検討の一部は、平成20年度国立保健医療科学院水道工学研修特別研究「気候変動と水道水質管理」に

おいて行われた。資料の解析にあたり、愛知県企業庁 岩城健二郎氏、横浜市水道局 松田浩明氏、御水資源機構 原田加奈子氏にご協力頂いた。本研究の一部は、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により行われた。ここに記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 環境省：地球温暖化影響・適応委員会報告書，第3章水環境・水資源分野 (2008)
- 2) 尾崎則篤，福島武彦，原沢英夫，小尻利治，河嶋克典：異なる時間スケールの気温，降水量，及び日射量の変動が河川水温に及ぼす影響，土木学会論文集，第678巻，pp.93-103 (2001)
- 3) 杉浦則夫：気候変動にともなう水道の生物とその対策技術，全国水道研究発表会講演集，第59巻，pp.678-681 (2008)
- 4) 神野健二，広城吉成：地球温暖化と地下水塩水化，水環境学会誌，第29巻，第2号，pp.72-76 (2006)
- 5) 遠藤尚志，内田晴敏，与田博恭：影響面から見た水道と地球環境問題，水道公論，第28巻，第11号，pp.31-35 (1992)
- 6) 国土交通省水資源部：平成21年度版日本の水資源 (2009)
- 7) 広津鍊一：水道施設のリスク管理——宮崎市富吉浄水場の水没事故報告——，水道協会雑誌，第76巻，第8号，pp.31-37 (2007)
- 8) 日本水道新聞社：梅雨末期の豪雨で浸水 榎野川の洪水で浄水池，ポンプ，補機類などが冠水 山口市朝田浄水場，水道公論，第45巻，第8号，pp.70-77 (2009)
- 9) 平成21年8月3日 水道産業新聞記事 (2009)
- 10) 東京都水道局：気候変動が水道事業に与える影響 (2008)
- 11) 海老江邦雄，伊藤陽司，早川 博，永禮英明：北見市水道水の断水に関する原因技術調査委員会報告書 (要約) (2007)
- 12) 北日本新聞社ホームページ
http://www.kitanippon.co.jp/contents/appear/11/521.html (2009年8月アクセス)
- 13) Steve E. Hrudey and Elizabeth J. Hrudey: Safe Drinking Water lessons from Recent Outbreaks in Affluent Nations, IWA Publishing, London, U.K. (2004), Table 4.1 より内容の抜粋，件数の算出を行った。

