

## 気候変動が及ぼす下水道への影響および適応策

Adaptation to the Effect of Climate Change Associated with Sewerage and Drainage Systems

岡本誠一郎\*

今後、地球温暖化による気候変動に伴い、社会インフラにもさまざまな影響が予想される。このため、国民の生命や財産、社会経済活動を保全、維持するうえで、インフラ分野での気候変動への適応策は重要な課題である。下水道は、地球温暖化への緩和、適応の両面に関わる社会インフラである。下水道に関連する気候変動影響としては、浸水リスクの増大や都市雨水の排除能力不足、富栄養化対策の要求の高まり、合流式下水道管から河川への直接流入、再生水需要の増大など、多岐にわたると想定されている。将来的に、下水道はこれらの影響への適応策としての役割を果たす必要に迫られると考えられる。

本稿では、気候変動に伴う下水道に関連する影響と適応策について、その具体的な内容や関連する行政動向などについて紹介する。

**Key words** : 気候変動適応策, 下水道, 内水排除, 再生水, 順応的マネジメント

### 1. はじめに

2016年11月4日にパリ協定が発効し、国際社会は温室効果ガス(GHG)排出の大幅削減に向けた取組みをスタートさせることとなった。パリ協定では、GHG削減による緩和策とともに、適応能力を向上させることにより気候変動への脅威に対して世界的な対応を強化することも目的として掲げられた。

人間活動からの代謝産物として出てくる廃棄物

や排水などはGHGの発生原因となるが、これらからエネルギーを回収することによりGHG排出削減に寄与し得る<sup>1)</sup>。下水道は、都市の代謝システムの一翼を担う重要なインフラであるが、下水道の分野では、たとえば汚泥消化ガスや下水熱の回収利用などがGHG削減対策に該当し、これらの取組みは、地球温暖化の緩和策として貢献し得る。

また、温暖化による今後の気候変動としては、強降雨時の降水量のさらなる増加や無降雨日数の

\* Seiichiro OKAMOTO, 国土交通省国土技術政策総合研究所下水道研究部下水道研究官 博士(工学) 〒305-0804 茨城県つくば市旭1, Ph. D., National Institute for Land and Infrastructure Management, MLIT, 1 Asahi, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken 305-0804 Japan (E-mail : okamoto-s92ta@nilim.go.jp)

増加などが予測されている<sup>2)3)</sup>。こうした気候変動に伴う水災害や渇水リスクの増大、さらには水質影響の懸念などに対しても、下水道は深く関連する性格を有しており、下水道分野における気候変動の影響への対応は適応策として重要である。このように、下水道は、温暖化への適応、緩和の両面に関わる社会インフラであるが、本稿では気候変動に伴う下水道に関連する影響とその適応策を中心に、その具体的な内容や関連する行政動向などについて紹介したい。

## 2. 気候変動による下水道への影響

### 2.1 想定される下水道関連の影響

IPCC第5次評価報告書では、今後、気温上昇をかなり低く抑えるための対策を講じたとしても、世界の平均気温や平均海面水位の上昇の可能性が高い<sup>4)</sup>とされており、さまざまな分野において深刻な影響が懸念されている。

気候変動に伴う下水道への影響についても多種多様なものが考えられ、いずれも影響の発現やそのリスクにはかなりの不確実性を伴うものが多いと考えられる。(公社)土木学会では、2007～2008年度に地球温暖化対策特別委員会を設置し、地球温暖化による水資源、防災、自然生態系、食糧生産、生活と健康、エネルギーと産業他の各分野への影響とともに、その緩和策、適応策について検討している<sup>1)</sup>。ここで整理された300項目近い影響と適応策から、下水道に関連すると考えられる項目を抜粋して表1にまとめた。下水道関連で想定される影響について、表1から概観してみたい。ここに示したとおり、下水道への影響としては、浸水リスクの増大や都市雨水の排除能力不足、富栄養抑制のための栄養塩除去の要求の高まり、合流式下水道管から河川への直接流入、再生水需要の増大など、多岐にわたる影響が想定されていることがわかる。

また、2015年11月に国土交通省では、政府全体の適応計画にさきがけて「国土交通省気候変動適応計画」<sup>5)</sup>を定めているが、ここでは気候変動による国土交通分野への具体的な影響を分野ごとに整理している。水災害、水資源、水環境など、下水道に関連すると考えられる影響について表2に

取りまとめた。

### 2.2 水災害に関する影響

気候変動に伴うさまざまな影響のうち、国土交通省関連では水災害分野については、比較的早くから影響の分析と適応策の検討が進められてきた。この分野の下水道に関連する影響について、もう少し詳細にみていきたい。水災害分野における気候変動適応策については、2008年6月に「水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方について(答申)」が示されるとともに、2015年には「水災害分野における気候変動適応策のあり方について～災害リスク情報と危機感を共有し、減災に取り組む社会へ～(答申)」が示され、水災害分野における気候変動適応策の基本的な考え方等が明らかにされている。

また、この間には、国土技術政策総合研究所(国総研)においても、気候変動による降水量変化が洪水流量等に及ぼす影響等についての研究結果を中間報告として公表<sup>6)</sup>するなどの検討が続けられてきた。

市街地の内水排除を受けもつ下水道では、5年や10年に1度の頻度で発生する降雨に対して雨水排除施設の目標を設定しているケースが一般的である。前出の中間報告<sup>6)</sup>では、近年の豪雨の傾向を把握するため、1960年から2009年までの50年間の57気象台の降雨データより、5年確率の60分間、10分間降雨強度の増加率を算出した結果、増加率は1.1倍程度(50パーセントイル値)、最大で1.3～1.4倍程度(95パーセントイル値)と試算されている。これらの結果をもとに行なった浸水シミュレーション結果では、将来の豪雨頻度の増加には、追加的な浸水対策の検討が必要であることが示されている。

環境省、気象庁では、IPCC第5次評価報告書で示されたRCPシナリオ(代表濃度経路シナリオ)<sup>7)</sup>に基づき、21世紀末の日本の気候に関する予測計算を行なっている<sup>3)</sup>。これによると、大雨による降水量(上位5%の降雨イベントによる日降水量)は、RCP2.6(低位安定化)シナリオでは約10%、RCP8.5(高位参照)シナリオでは約25%増加する(全国平均・年平均)とされている。一方で無降雨日数(日降水量が1.0mm未満の日数)についても、



表1 温暖化の影響と適応策(下水道に関連するおもな事項)

現象	分類	影響	適応策
気温・水温の上昇	水供給	アオコ発生時期の長期化	下排水処理による栄養塩流入防止
	下水とその処理	富栄養化を抑制するための栄養塩除去の要求の高まり	栄養塩除去技術の開発と導入等
		閉鎖性水域の水質汚濁	処理水の閉鎖性水域バイパス
		水温の上昇	熱回収(暖房への利用)
		嫌気性処理効率の向上	嫌気性処理技術の積極導入
	水環境	植物プランクトンの増加による赤潮・アオコの発生時期の長期化	下排水処理による栄養塩流入防止
	都市生活	冷房の使用増, 暖房の使用減	下水処理水や地下水による打ち水による放熱の促進 せせらぎの創出による放熱の促進
農村生活	農業用水および肥料の不足	下水処理水や下水汚泥, 浚渫底泥の栄養塩の利用技術の開発と導入	
降雨パターンの変化Ⅰ(渇水対策)	水供給	渇水危険度増加	家庭内・ビル内での循環利用 下水処理水の再利用 活性炭吸着や膜処理などの導入 雨水の貯留と利用
	下水とその処理	再利用需要の増大	高度処理技術の開発と適用 処理水の需要や要求される水質に関する情報の蓄積と処理 処理雨水の利用や促進のための基準, 諸制度の充実
		水供給量の低下に起因する下水混入率の増加	高度処理技術の開発と適用 処理水の需要や要求される水質に関する情報の蓄積と処理 処理雨水の利用や促進のための基準, 諸制度の充実
	水環境	河床露出	下水処理水の放流 下水処理水の環境安全性の向上
	都市生活	渇水危険度増大	カスケード的水利用の促進 下水処理水の再利用の促進 下水処理場・処理装置の分散配置
	農村生活	渇水危険度増大	安全水源としての下水処理水の利用等
		農業用水の不足	安全水源としての下水処理水の利用等
降雨パターンの変化Ⅱ(豪雨洪水対策)	水関連災害(流域・河川)	浸水リスクの増大	高度化した情報技術を用いた既存施設の連携 氾濫水の迅速な排水や非常用排水樋門の整備 災害支援体制の強化や防災ネットワークの構築など 降雨予報の精度向上
	水関連災害(沿岸域)	沿岸都市域における洪水増大	遊水地・貯水池の整備 排水システムの強化
	都市生活	浸水被害の可能性の増加	雨水貯留・浸透施設の設置
		避難可能な時間の短縮	ハザードマップや災害リスクなどの情報を提供し支援 ユビキタス社会の実現(河川水位や氾濫情報, 避難経路などの情報提供)
		都市雨水の排除能力不足	可搬式の排水ポンプ等の整備
台風・高潮の変化	下水とその処理	合流式下水道管から河川への直接流入	管径の拡張や下水処理施設の効率の見直し 台風時の生活排水・工場排水の規制
	都市生活	浸水や洪水による被害	ポンプ新設
複合災害	下水とその処理	地震による下水処理施設の稼働停止による感染症の拡大	下水処理施設の耐震化 起こり得る感染症への対策
		下水浄化施設の停止およびそれに伴う感染症の危険	下水処理施設の耐震化 起こり得る感染症への対策

\* 文献1)の表より抜粋して作成(一部記述を改変)

表2 各分野への影響(下水道関連)

分野	影響
自然災害 (水害)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・時間雨量50mmを超える短時間強雨や総雨量が数百mmから千mmを超えるような大雨が発生し、全国各地で毎年のように甚大な水害(洪水、内水、高潮)が発生</li> <li>・気候変動により、今後さらにこれらの影響が増大することが予測されており、施設の能力を上回る外力による水害が頻発するとともに、発生頻度は比較的低い施設の能力を大幅に上回る外力(災害の原因となる豪雨、高潮などの自然現象)によりきわめて大規模な水害が発生する懸念</li> </ul>
水資源	<ul style="list-style-type: none"> <li>・大雨の頻発の一方で、年間の降水の日数は逆に減少しており、毎年のように取水が制限される渇水が生じている</li> <li>・将来においても無降水日数の増加や積雪量の減少による渇水の増加が予測されており、地球温暖化に伴う気候変動により、渇水が頻発化、長期化、深刻化し、さらなる渇水被害が発生することが懸念</li> </ul>
水環境	<ul style="list-style-type: none"> <li>・気候変動によって、水温の変化、水質の変化、流域からの栄養塩類等の流出特性の変化が生じることを想定</li> </ul>
国民生活・ 都市生活	<ul style="list-style-type: none"> <li>・都市の気温上昇はすでに顕在化しており、熱中症リスクの増大や快適性の損失など都市生活に大きな影響</li> <li>・将来、都市化によるヒートアイランド現象に、気候変動による気温上昇が重なることで、都市域ではより大幅に気温が上昇することが懸念</li> </ul>

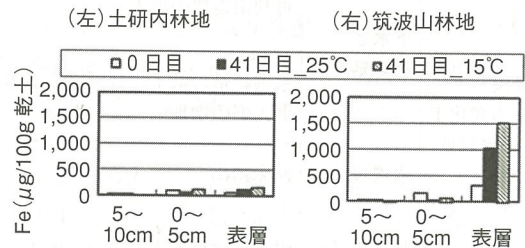
\* 文献5)をもとに作成

全国的に増加傾向(RCP8.5シナリオでは約10日間増加、全国平均・年積算)とされている。こうした傾向からも、将来的な浸水被害や渇水の頻発が懸念される。

### 2.3 水質等に関する影響

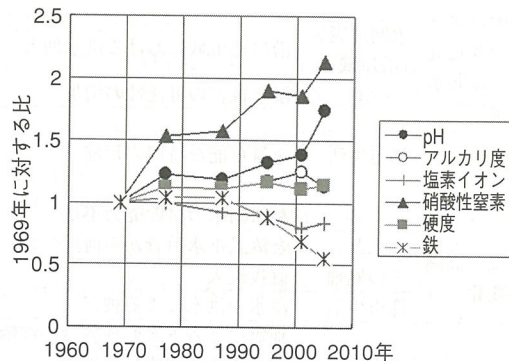
気候変動が水質等に及ぼす影響要因と、その相互の関連は複雑であり、今後のさらなる調査研究が必要と考えられる。これまでの各種調査、報告では、たとえば湖沼では、水温上昇に伴って溶存酸素の低下や、植物プランクトンの増加、水循環が十分に行なわれなくなったりすることで、水質が悪化する可能性が指摘されている<sup>8)9)</sup>。また、河川でも水温の上昇は、溶存酸素量の低下、溶存酸素消費を伴った微生物による有機物分解反応、硝化反応の促進、藻類の増加などを通じて、水質に影響を及ぼすことが想定される<sup>9)</sup>。下水は栄養塩の主要排出源であり、高度処理の導入の要請が強まるなどの影響が想定される。水温の上昇は下水処理機能そのものへの影響も考えられる<sup>1)</sup>。さらに2.1で述べた豪雨の頻発は、合流式下水道の処理区域においては、雨水と混ざった未処理下水の越流状況も変化させることから、その対策への影響も考えられる<sup>1)10)</sup>。

河川・湖沼等の水質は、水圏内だけでなく流域の環境変化の影響も受けて変化していると考えられる。従前、筆者も関わっていた国研土木研究所



\* 文献11)より抜粋して引用

図1 気温の変化による流域からの元素流出の変化例(採取0日目と41日目の25°Cおよび15°Cの条件におけるFeの溶出量の比較)



\* 文献12)より引用

図2 河川表流水質の経年変化(水道統計データによる)



の研究事例を1つ示すと、温度の上昇により土壌からの流出傾向が変化する可能性が示唆されている。筑波山林地で採取した土壌の溶出試験を行った結果、土壌の種類によるが温度が高いほど硝酸の溶出量は多く、鉄の溶出量は低下しており(図1)<sup>11)</sup>、これは河川の気温と水質データによる統計解析結果の傾向(図2)<sup>12)</sup>とも一致していた。こうした流域の環境変化に伴う影響に関する知見は未だ十分ではないが、将来的な水質保全対策のうえでノンポイント汚濁対策等に影響を及ぼす可能性も考えられ、今後の調査研究成果の蓄積が待たれる。

### 3. 下水道における気候変動適応策の検討

気候変動によるさまざまな影響に対し、政府全体として整合のとれた取組みを総合的かつ計画的に推進するため、2015年11月27日に気候変動の影響への適応計画が閣議決定された。

また前述のとおり、国土交通省では政府計画にさきがけて「国土交通省気候変動適応計画」<sup>9)</sup>を定め、政府計画へも反映させている。背景には、わが国では気候変動に係わる状況は、表2でもみたとおり、国土交通分野においてすでに人命や人の健康、社会経済活動に多大な影響が及ぶ状況にあり、適応策を実施することの重要性、緊急性は諸外国と比較してもきわめて高いという認識がある。国交省適応策の基本的な考え方としては、従来から実施している緩和策と適応策を車の両輪として取組むこととし、また適応と同時に緩和にも資する施策を積極的に推進することとしており、具体的につぎの諸点を考慮しつつ個々の適応策を選定している。

- ①不確実性を踏まえた順応的なマネジメント
- ②現在現われている事象への対処
- ③将来の影響の考慮
- ④ハード、ソフト両面からの総合的な対策
- ⑤各種事業計画等における気候変動への配慮
- ⑥自然との共生および環境との調和
- ⑦地域特性の考慮、各層の取組み推進(地方公共団体、事業者、住民など)

表3には、同計画に示された適応策のうち、下水道に関連する事項を抜粋して整理した。短時間

強雨や大雨の頻度増などは、すでに具体的な予測が行なわれており<sup>2)3)</sup>、表3からも読み取れるように、この予測に対応したハード・ソフトの適応策の検討が進められている。これらは前記②のとおり、すでにわが国で観測され顕在化している事象としてとらえられており、影響の重大性もとくに大きい<sup>9)</sup>とされている。水防法等の一部改正(2015年度改正)等に代表されるように、具体的な対応が進められているものも多い。

また、水資源・水環境分野においては、渇水の頻発や水温の上昇、水質の変化などの影響が想定され、一部の影響は重大性がとくに大きい<sup>9)</sup>とされている。今後、農業用水や都市・工業用水としての下水処理水の再利用への要請(写真1)や、高度処理計画の見直しなどが適応策の有力なメニューとなってくることが予想される。

しかしながら、その影響予測や適応策のフィージビリティなどの検討は現状では十分とはいえず、またその影響が予測されたとしても、結果にはかなりの不確実性を伴うことも事実である。前記①のとおり、気候変動のモニタリングを継続しつつ、結果として生じる影響やそのリスク評価を行ない、社会経済状況や、既往の対策・新たな対策によるリスク低減効果も踏まえた適応策の選択を行なう「順応的なマネジメント」が重要となってくる。

表3のとおり、水環境に関しては、気候変動に伴う水温上昇等水域の直接的な変化だけでなく、2.3でも例示したような「流域からの栄養塩類等の流出特性の変化に関する調査の実施」が必要とされている。また、健康に関する影響(合流式下水道)については、水域の水質汚染による下痢症等は国内では具体的な報告には至っていないが、潜在リスク要因として継続的なモニタリングが重要である。こうした分野における調査研究の蓄積は、それぞれの予測される影響に対する的確な適応策の企画立案には不可欠であり、国総研を含む関係機関での今後の取組みが重要であると考えている。

### 4. おわりに

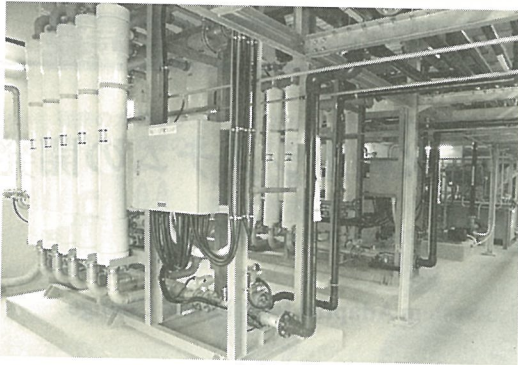
本稿では、国土交通省気候変動適応計画におけ

表3 国土交通省気候変動適応計画における適応策(下水道関連)

分野	想定外力	項目	適応策
自然災害 (水害)	比較的発生頻度の高い外力に対する防災対策	施設の着実な整備	・引き続き堤防や洪水調節施設, 下水道等の施設の整備を着実に実施 ・施設計画の目標や内容などは, 近年の大雨の発生頻度の増加等を踏まえ必要に応じて見直し
		既存施設の機能向上	・治水機能の増強等を行なうダム再生, 既存の下水道施設の増補管や貯留施設の整備など, 既存ストックのより一層の機能向上
		維持管理・更新の充実	・ICT等を活用し, 河川や下水道の施設の状況をきめ細かく把握 ・CCTV等を活用し, 洪水や内水に関する情報の把握に努める
		施設の一体的な運用	・一体的運用の推進を図るため, 河川および下水道の既存施設を接続する連結管や兼用の貯留施設等の整備を推進
	施設の能力を上回る外力に対する減災対策	観測等の充実	・河川や下水道などの水位等を確実に観測するよう観測機器の改良や配備の充実
		水防体制の充実・強化	・重要水防個所や危険個所の洪水時の情報を水防管理者に提示 ・洪水だけでなく, 内水および高潮についても水位を周知 ・洪水や内水に関する活動拠点の整備や水防資機材の備蓄
		既存施設の機能を最大限活用する運用	・内水対策について, 水位情報等を活用した下水道管渠のネットワークや排水ポンプの運用方法について検討
		街づくり・地域づくりとの連携	・人口減少等を踏まえたまち・地域の再編機会をとらえ, 災害リスクを考慮したまちづくり・地域づくりにより減災を図る
			・流域のもつ保水・遊水機能を確保するなどの総合的な浸水対策を推進
			・地下空間の重要施設の浸水防止や, 地下空間からの避難行動の時間の確保 ・複数の都市共同の効率的な下水道等の整備や民間による雨水貯留浸透施設, 止水板の設置などの重点的推進 ・ハザードマップのみやすい表示, 想定浸水深, 標高, 退避方向, 避難場所などの記載, 標識設置
水資源	雨水・再生水の利用	・雨水利用のための施設の設置を促進するため, 計画, 設計に係る技術基準類の改定に向けた検討 ・地域のニーズ等に応じ, 下水処理場に給水栓等の設置を進め, 道路維持用水や樹木散水などを含め, 緊急時にも下水処理水の利用を促進 ・わが国が有する水の再利用技術の国際標準化を含めた規格化の検討により水の再利用を促進	
	渇水時の河川環境モニタリング	・渇水時の河川流量の減少による, 水生動植物等の生態系や水質など河川環境への影響の懸念があるため, 渇水時の河川環境に関するモニタリングを実施し知見を蓄積	
水環境	水環境全般の適応策	・水質のモニタリングや将来予測に関する調査研究を引き続き推進するとともに, 水質保全対策を推進 ・気候変動に伴う水温上昇等, 水域の直接的な変化だけでなく, 流域からの栄養塩類等の流出特性の変化に関する調査の実施 ・下水道の高度処理, 合流式下水道改善対策等の水質保全対策を引き続き推進	
国民生活・都市生活	ヒートアイランド対策	・都市公園の整備や, 道路・下水処理場等の公共空間の緑化の推進 ・下水処理水のせせらぎ用水, 河川維持用水などへのさらなる利用拡大に向けた地方公共団体の取組みの支援 ・雨水貯留浸透施設の設置の推進等により水面積を拡大	
その他分野	健康への影響に関する適応策	・局地的豪雨による合流式下水道での越流は閉鎖性水域や河川下流の水質が汚染され下痢症発症の可能性(日本では具体的な報告に至っていない)。合流式下水道改善対策等の水質改善対策を引き続き推進	
基盤的な取組み	観測・調査研究・技術開発等	・河川環境全体の変化等を把握, 予測することは现阶段では困難な状況であり, 引き続き調査・研究を推進	

\* 文献5)をもとに作成





\* 下水道革新的技術実証事業(B-DASHプロジェクト)によるUF膜と紫外線消毒の組合わせによる再生処理技術の実証施設

従来技術より低コスト・低CO<sub>2</sub>排出量で、かつ生野菜栽培等にも適した再生処理技術の確立を目指している

写真1 下水処理水の再生処理実証プラント：沖縄県糸満市浄化センター

る気候変動による影響とその適応策を中心に、下水道との関連、下水道による適応策の概要について紹介してきた。とくに水環境分野の影響予測やリスク評価、さらに適応策の順応的マネジメントについては、引き続き多くの調査研究も必要であると考えている。関係機関とも連携・協力しつつ必要な取組みを進めて参りたい。

—参考文献—

- 1) 土木学会地球温暖化対策特別委員会：報告書 地球温暖化に挑む土木工学 ([http://www.jsce.or.jp/committee/ondanka-taisaku/ondanka\\_hokoku.shtml](http://www.jsce.or.jp/committee/ondanka-taisaku/ondanka_hokoku.shtml)) (2009).
- 2) 文部科学省, 気象庁, 環境省：気候変動の観測・予測及び影響評価統合レポート「日本の気候変動とその影響」(2012年度版) (2013).
- 3) 環境省, 気象庁：21世紀末における日本の気候不確実性評価を含む予測計算 ([http://www.env.go.jp/earth/ondanka/pamph\\_tekiou/2015/](http://www.env.go.jp/earth/ondanka/pamph_tekiou/2015/)) (2015).
- 4) IPCC (翻訳：文部科学省, 経済産業省, 気象庁, 環境省)：気候変動2014統合報告書 政策決定者向け要約用語集, SPM2.4 2100年以降の気候変動, 不可逆性及び急激な変化 ([http://www.env.go.jp/earth/ipcc/5th\\_pdf/ar5\\_syr\\_spmj.pdf](http://www.env.go.jp/earth/ipcc/5th_pdf/ar5_syr_spmj.pdf)) (2014).
- 5) 国土交通省：国土交通省気候変動適応計画～気候変動がもたらす我が国の危機に総力で備える～ ([http://www.mlit.go.jp/report/press/sogo10\\_hh\\_000118.html](http://www.mlit.go.jp/report/press/sogo10_hh_000118.html)) (2015).
- 6) 国土交通省国土技術政策総合研究所気候変動適応研究本部：気候変動適応策に関する研究(中間報告), 国総研資料第749号, II-54~II-57 (<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn0749pdf/ks074906.pdf>) (2013).
- 7) 環境省：IPCC第5次評価報告書の概要-第1作業部会(自然科学的根拠)-, p.36~39 ([http://www.env.go.jp/earth/ipcc/5th/pdf/ar5\\_wg1\\_overview\\_presentation.pdf](http://www.env.go.jp/earth/ipcc/5th/pdf/ar5_wg1_overview_presentation.pdf)) (2014).
- 8) 文部科学省, 気象庁, 環境省：気候変動の観測・予測・影響評価に関する統合レポート「日本の気候変動とその影響(2012年度版)」概要パンフレット (2013).
- 9) 中央環境審議会：日本における気候変動による影響の評価に関する報告と今後の課題について(意見具申), p.31, p.71, p.76 (<http://www.env.go.jp/press/100480.html>) (2015).
- 10) 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：日本における気候変動による影響に関する評価報告書, p.305~306 (<http://www.env.go.jp/press/100480.html>) (2015).
- 11) 岡本誠一郎, 鈴木 穰, 北村友一：地球環境の変化が河川湖沼水質に及ぼす影響の評価に関する研究, 平成25年度下水道関係調査研究年次報告書集, 土木研究所資料第4294号, 106~109 (<http://www.db.pwri.go.jp/pdf/D8583.pdf>) (2014).
- 12) 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).