

地球温暖化による水循環の変化
—AR4・SREXからAR5へ—

鼎 信次郎, 平 林 由希子

水環境学会誌 第35巻 第11号 (2012)

pp. 356 ~ 362 別刷

公益社団法人 日本水環境学会

地球温暖化の水環境への影響と適応策

すでに顕在化しつつあるといえる地球温暖化に対する対策としては、元となる温室効果ガス削減を目指す緩和策 (Mitigation) と同時に、生じる問題にどのような適応策 (Adaptation) で臨むのが重要な課題となっている。

本特集においては、温暖化が水環境に与える影響について、量および質の面からの影響評価事例について概説いただくと同時に、それらの影響に対しどのような適応策で臨めばよいのかについてご紹介いただく。

(担当編集企画委員 東京大学 栗栖 聖)

地球温暖化による水循環の変化 —AR4・SREX から AR5 へ—*

鼎 信次郎 平 林 由希子

1. はじめに

この小文の目的は、人為的な気候変化 (いわゆる地球温暖化) による世界の水循環の変化について、現時点での主だった知見をまとめ、水環境学分野の諸兄諸姉に紹介することである。著者の専門は水循環の量的側面を扱う水文学であり、本特集内の他の論文が水環境や水質の

様々な側面を扱うため、本稿ではあえて水環境や水質などには踏み込まず、水の量的側面についてのみ記述を進める。

本稿では量的側面に絞って記述を進めるものの、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の第 4 次評価報告書 (AR4)、第 2 巻の第 3 章 (Freshwater の章)¹⁾ の目次の一部として Water Quality や Soil Erosion, Sanitation や Water Supply, Freshwater Ecosystems などが見られるように、IPCC の報告書は水環境や水質に関わる様々な事象を扱っていないわけでもなければ、水の量的側面と切り離して議論しているわけでもない。両者は、同じ章の中で統一的に扱おうと試みられている。2013 年から 2014 年にかけての発行が予定されている第 5 次評価報告書 (AR5) の中身は作成中であり、各国の専門家レビューを終えたとはいえ大幅な改訂の可能性も残されているが、AR4 と同様に水の量と質の両側面を同一の章の中で統一的に扱おうという試みが継続されると考えられる。

一方、AR4 と AR5 の中間時期となる 2011 年末から 2012 年にかけて、気候の極端現象と適応に関する特別報告書 (通称 SREX)²⁾ が IPCC の手によって取りまとめられ、発行された。SREX は大気や海洋、雪氷などの気候システムの変化を扱うワーキンググループ 1 (WG1) と影響評価および適応策を扱う WG2 との合作であり、どちらかといえば WG2 が主体となって作成された。ちなみに、上記の AR4 第 2 巻は WG2 の成果であり、AR の巻号と WG の番号は対応している。SREX で



Shinjiro Kanae

平成 6 年 東京大学工学部卒業
11 年 同大学大学院工学系研究科修士
同年 同大学生産技術研究所助手
15 年 総合地球環境学研究所助教授
19 年 東京大学生産技術研究所准教授
21 年 東京工業大学大学院情報理工学研究科准教授



Yukiko Hirabayashi

平成 11 年 芝浦工業大学工学部卒業
16 年 東京大学大学院工学系研究科修士
同年 山梨大学大学院医学工学総合研究部助手
21 年 東京大学大学院工学系研究科准教授

* Changes in Hydrological Cycle Due to Global Warming
— from AR4 and SREX to AR5 —

は、本論文の著者自身も共著者の一人となった第3章³⁾が本論文との関係が深い。ところで、SREXでは水環境や水質についてはほとんど言及されていない。洪水や渇水・干ばつ、熱波などの極端現象の変化による影響とそれらへの適応策は、水環境や水質分野にとっても関心の高いテーマであると考えられ、今後の研究の進展が期待される。以下の文中においては、AR4やSREXというような用語を記す際に一々引用を明記しない場合がある。冗長さを避けるためということでご理解いただきたい。

2. 水循環変化の動因 (Drivers)

AR4のFreshwaterの章では、将来の水循環や水資源の変化を算定するための様々な条件や要因などを、動因(Drivers、訳語は花崎ら⁴⁾のものを採用した)という形で整理している。動因はさらに、気候動因(Climatic Drivers)と非気候動因(Non-climatic Drivers)とに分けて記述されている。また、そのような整理の中で不確実性についても言及されている。動因による整理はAR5でも引き続き用いられることであろう。ここでも、この整理に倣って動因および不確実性という観点から記述を進める。

2.1 気候動因1(大気・海洋システムに関わる動因)

気候動因の最も主だったものは降水量、気温、蒸発要求量(地表面での正味放射、大気湿度、風速および気温によって決まるもの)である^{1,4)}。これらの変化の結果として、水資源賦存量や流出量、土壌水分量、地下水涵養量などの水循環の将来変化が推計される。ただし、降水量や気温といった大気変数から流出量や土壌水分量という陸面変数へと一方通行の流れがあるだけでなく、土壌水分量の多寡が降水量の多寡に影響を与える⁵⁾などの逆向きのフィードバックが気候システムの中には内在していることも忘れてはならない。

将来の降水量や気温などについての情報源の第一は、流体力学・熱力学・放射伝達過程などの物理方程式を駆使して全球の気候の変動や変化を数値的に求める計算機上のモデル、いわゆる気候モデルである。英語ではClimate Modelと書かれることもあればGCMと書かれることもある。余談にはなるが、GCMの本来の語源はGlobal Climate Modelではなく、(大気や海洋の)大循環モデルという意味のGeneral Circulation Modelである。SREXでは、情報源の第一はGCMであることが述べられると同時に、1)GCM、2)GCMの出力を力学的あるいは統計的にダウンスケールしたもの、3)物理的な理解、4)過去(原文ではrecent historicalだが、古気候情報ということもあり得る)の気候変化、の4つが情報源であると述べられている³⁾。ここから、やみくもにGCMからの数値的な出力だけをアセスメントに使っているわけではない(使うべきではない)、という気候学者の意図を読み取ることができる。

将来気候のシミュレーションの不確実性は主として気候モデルの選択と排出シナリオの選択との両者に起因するが、不確実性の幅は近い将来から遠い将来へと進むにつれ大きくなり、20年程度先の近い将来においては気候モデルの持つ不確実性や気候モデルの選択が不確実性の第一の要因となり、21世紀末頃の遠い将来においては排出シナリオの選択が第一の要因となると考えられて

いる¹⁾。ただし、この言説は全球平均地表気温の変化や全球的な放射強制力などを対象としたものと考えべきであり、必ずしも水循環や水資源について当てはまるものではない。地域毎に変化の様相が様々である水循環の変化は、遠い将来においても気候モデルの選択の方に大きく左右されるのではないとも考えられている³⁾。

2.2 気候動因2(陸面水文システムに関わる動因)

水資源に関わる水循環(河川流量や土壌水分量、地下水涵養量など)の算定においては、気候シミュレーションの生み出す不確実性に加えて、陸面水文モデルとそその一部としての積雪・融雪モデル、河川モデルなども不確実性の源となる。SREX第3章では、既存のいくつかの文献をレビューした上で、これら陸面の水文過程のシミュレーションが生成する不確実性の幅は、気候シミュレーションによる不確実性の幅よりも小さいと述べられている。同様に、影響評価研究には不可欠なダウンスケールやバイアス補正手法の選択も不確実性の源ではあるが、与える影響は気候モデルの選択や排出シナリオの選択よりも小さめであると書かれている。しかし、これらの結論は限られた文献から得られた限定的なものであり、最終的な結論と捉えるのは時期尚早であろう。陸面水循環の将来変化に関わる不確実性の検討は、まだ始まったばかりと考えたほうがよい。

全球スケールの陸面水循環モデルや水資源モデルがどのような不確実性を持つかについては、2011年頃までの数年間、EU-WATCHという枠組みの下でモデル相互比較プロジェクト⁶⁾が行われた。AR5へ向けには、Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project(ISI-MIP)というモデル相互比較プロジェクトが、やはりヨーロッパ主導で、水だけでなく農業など複数の対象について進行しつつある。世界気候研究計画(WCRP)による陸面モデル相互比較としては、日本主導でGSWP3(Global Soil Wetness Project 3)が計画されている⁷⁾。これらを通しての結論はまだ明快なものではないが、近い将来、水循環の算定に関わる不確実性について、とくに全球規模での不確実性の様相および原因について、新たな総合的知見が得られる可能性がある。

上記のような全球規模での陸面水文シミュレーションに現時点では明示的に取り入れられていない要素の一つは、海面上昇である。海面上昇は沿岸域の地下水塩水化⁸⁾や河川への塩水遡上に寄与する恐れがあり、水利用や健康、農業への悪影響が懸念されている。また、海面上昇は沿岸地域の洪水リスクの変化にも影響を与えるかもしれない。これら海面上昇が水循環や水資源に与える影響についての研究も、まだ始まったばかりの段階といえる。

2.3 非気候動因

非気候動因として挙げられるものは、土地利用の変化、ダムや貯水池の建設、河川改修などである。AR4では、汚濁物質の排出や下水処理、塩水の淡水化などといった項目も挙げられている。水の量的側面に限ったとしても、下水の再利用や塩水の淡水化は量を変化させる動因であるし、汚濁物質の著しい排出は実質的に使える水の量を減少させる動因となる。先に述べたように、量と質を切り離して考えることはできない。

とはいえ、水の量的側面に最も大きな影響を与える動因は灌漑地の増加であり、灌漑地の増加を支えるための

ダムや貯水池の建設である。1960年頃から2000年にかけて灌漑地の面積は約2倍に増え、貯水池の総容量は1960年頃からであれば約3倍、1950年頃からであれば約10倍に増えた。この間、世界人口も約2倍の伸びを示した。これらにともなって、貯水池からの灌漑取水量も増加の一途を辿った⁹⁾。これらに関するデータは2000年頃に止まっていることが多いが、人口はそこからさらに1～2割増加しており、それらも同様に増加した可能性は高い。灌漑のための地下水からの取水量も増加し、地下水の汲み上げなどの人為的な行為が過去約40年で約15mmから30mm程度の海面上昇を引き起こしたのではないかという推定もされている^{10,11)}。これらの数字はその期間の全海面上昇の約2～4割に相当する量であり、AR4が海水膨張、氷河氷帽の喪失などで説明しきれなかった海面上昇の残差にほぼ相当する。

過去の変化についての推定⁹⁻¹¹⁾が、この数年間に飛躍的な進歩を遂げたとはいえ、灌漑地やダム、貯水池とそれらからの取水が今後どのように増減するかを予測することは、困難なままである。Hanasakiらの最新の試み¹²⁾では、将来の灌漑地変化のシナリオのいくつかを紹介されているとともに、それらの灌漑地拡大シナリオが水循環や水需要に与える結果の例が示されている。ダム・貯水池の世界的な将来変化については、さらにシナリオ化は難しいが、水循環に与える影響は地球温暖化以上かもしれない。過去や現在についてのデータではあるが、世界中のダムや灌漑地に関する様々なGIS的データが蓄積、公開されたことが、WG2・Freshwaterの分野における過去数年間の進展の主要な動因の一つであったといえる。たとえば、世界中のダムが水系生態系に与える影響についての研究もいくつか現れ始めた。

灌漑地以外の土地利用の変化も水循環に影響を与える。ただ、国内の緑のダム論争がなかなか決着がつかないのと同様に、地球規模での土地利用変化が水循環に与える影響の評価は容易ではない。

3. シナリオ

3.1 Projectionとは

ところで、冒頭で「世界の水循環の変化」と簡単に書いたが、これには注意点、科学英語で言うところのCaveatが存在する。まず、これまでどのように変化してきたか、という過去から現時点への変化という側面がある。この場合、水循環に変化が見られたとしても、どこまでが人為的な気候変化のせいであるかを判別し、原因を特定することは容易ではない。次に、将来どのように変化するか、という側面がある。将来の変化は数値シミュレーションによって求めることが一般的である。しかし、それはばっちり当てを狙った「予測」とは一味違うものである。「予測」は英語で書けばPredictionやForecastに相当するものである。将来の気候変化に関わる数値シミュレーションに対しては、一般にProjectionというテクニカルタームが使われる。Projectionは「あるシナリオに沿った将来を仮定したら、このような結果が想定される」というシナリオ・ベースのものである。あるシナリオという仮定の下でのみ成り立つ限定的な将来推定である。本稿でも筆がすべって「予測」という単語を、敢えても含めて使って

しまう場合があるかもしれないが、内容的にはほぼ必ずProjectionのことである。また、Projectionを逆向きに使ったともいえるバックキャストという手法も、適応策や緩和策の策定のためにしばしば用いられる。

3.2 SRES

AR4からSRESの時点では、SRESという略称で呼ばれる将来シナリオのセット¹³⁾が用いられた。SRESとSRESは一字しか変わらないので、注意が必要である。さて、そのフルネーム(Special Report on Emissions Scenarios)が示すように、SRESは、本来的には温室効果ガスや硫黄酸化物などの将来排出量を規定するシナリオである。以下に述べるようにSRESといえは4シナリオと覚えられている方も多かもしれない。実は、SRESという風呂敷の中には30から40ほどの個別シナリオがある。多数の個別シナリオは利用者にとっても混乱の元となるためか、4つの叙事的シナリオ(ストーリー・ラインとも呼ばれる)が作成された。

この4つのストーリー・ラインにはA1、A2、B1、B2という略称が付され、A-Bおよび1-2のそれぞれの軸は、A:経済高度成長を重視、B:環境保全を重視、1:グローバル化が進む、2:地域化が進む、を表現するものとされている。また各々のストーリー・ラインに対応するマーカー・シナリオも設定された。4つのマーカー・シナリオ以外の多数の個別シナリオも4つのストーリー・ラインの中に分類された。マーカー・シナリオは他のシナリオに比べて中心的というわけではなく多数のシナリオはすべて同格というのが公式説明となるようだが、少なくとも水循環・水資源の分野では、SRESといえは約40のシナリオということではなく、SRESといえは4つという形で主だった研究成果が発表されてきた。

本来的には排出シナリオであると述べたとおり、気候シミュレーションにとってSRESは将来の温室効果ガス濃度を規定するシナリオである。つまり、上記の気候動因1を規定するシナリオとしての役割を果たすものである。加えて、水資源研究にとってSRESはもう一つの役割を果たしてきた。SRESからはガス排出量算定の中間変数あるいは副産物として、将来の人口やGDPなどの社会・経済に関する推計値が出力される。これらの値をうまく利用することによって、将来の水需要あるいは取水量などを推定することが可能になる。つまり、SRESは非気候動因の方についてのシナリオ形成の基盤ともなる。気候動因1と非気候動因との両方をSRESに基づいて算定した将来の水需給推計の代表例の一つはOki and Kanai¹⁴⁾であり、そのエッセンスは本学会誌でも紹介させていただいたことがある¹⁵⁾。このOki and Kanaiの出版年が2006年でありAR4の出版年が2007年であることからお分かりいただけるように、SRESを用いての将来水資源評価はAR4/WG2にとって、ぎりぎりやっとなら合ったというようなタイミングであった。

3.3 RCPとSSP

このようなSRESに基づいた将来推計は、AR5/WG2においても引き続き利用されることであろう。しかし、気候動因1に相当する気候シミュレーションを担当するWG1では、2013年発行予定のAR5で取り上げる成果は、新たなシナリオセットに基づいたものが主流となっ

ていると考えられる。

AR5/WG1 にとっての新たなシナリオは RCP (Representative Concentration Pathways)^{16,17)} というものである。RCP には4つのシナリオがあり、RCP2.6, RCP4.5, RCP6, RCP8.5 と呼ばれる。各々の数字は工業化以前と比較した2100年頃の放射強制力を表している。放射強制力の定義をここに短く記すことは簡単ではないので、気候学の教科書や用語集を参照していただきたい。RCP8.5は将来の温室効果ガスの最大排出量に相当する高温化シナリオであり、RCP2.6は気温上昇を相当程度(目安として2度以下程度)に抑えた場合に相当する低温化シナリオである。RCPに沿って行われた気候シミュレーションはCMIP5という略号で総称される。AR4のときに主流であったSRESに沿った気候シミュレーションはCMIP3という略号で呼ばれる。CMIP4がない理由は、C4MIPというものが別にあるためと、AR5とCMIP5とで5を合わせるためとされている。

従来のSRESから新たなRCPへの変更は、単にちょっとした定量的な数字の変化には留まらない。IPCCのWG1とWG2とWG3との相互依存関係を大きく変えるものである。その詳細を説明するためには別に数ページの解説論文が必要となるため、ここでは深入りした解説は行わない。上記のRCPについての文献^{20,21)}などを参照していただきたい。

水循環・水資源研究の立場からすると、SRESとRCPとの大きな違いの一つは、RCP単独では社会・経済シナリオが提供されないという事実である。RCPはあくまで気候シミュレーションを走らせるために必要な温室効果ガス等の排出に関して情報を提供するだけのものである。各国機関によるRCPを用いた気候シミュレーションは事実上終了し、AR5/WG1は結果の取りまとめに鋭

意取り組んでいるところであろう。

WG2が必要とするRCPに対応した社会・経済シナリオはSSP (Shared Socio-economic Pathways) と総称される。そのプロトタイプのようなものはできているようだが、広く世界中の影響評価研究コミュニティが使える形での整理・公開は遅れているようだ。RCPになってよくなった部分も多々あるのだろうが、気候動因が先行し非気候動因が後回しになっているのは我々からすると困った点ではある。また、1つのRCPに対して最大5つのSSPが準備される可能性があるとのことである(厳密にいえば5つの叙述的シナリオであり、個別シナリオはさらに多くなる可能性もある)。4掛ける5は20。シナリオの幅や不確実性の評価は重要であるとはいえ、一部の巨大・先端研究機関以外は、SSPの数の多さを扱いきれないかもしれない。影響評価研究は世界各地の地元の研究者が行う場合も多く、このシナリオの多さが研究上のボトルネックの一つとなるかもしれない。RCPとSSPを気候動因および非気候動因の両方に適用した上で将来の世界の水需給を検討した研究例は限られており、Hanasakiらの試み¹²⁾が本稿執筆時点では唯一のものと考えられる。2014年発行予定のAR5/WG2の原稿がすでに作成半ばであることを考えると、RCP・SSPもWG2にとっては、ぎりぎりやっとなら間に合ったか間に合わなかったか、というタイミングに再びなってしまった。

また、IPCC的なRCPやSSPに従うシナリオ設定だけが我々の考えるべき将来像のすべてか、ということについても考慮の余地がある、という当たり前のことも追記しておきたい。

4. 水循環の変化

4.1 水資源賦存量の変化

前置きが長くなったが、地球温暖化時の水循環の変化

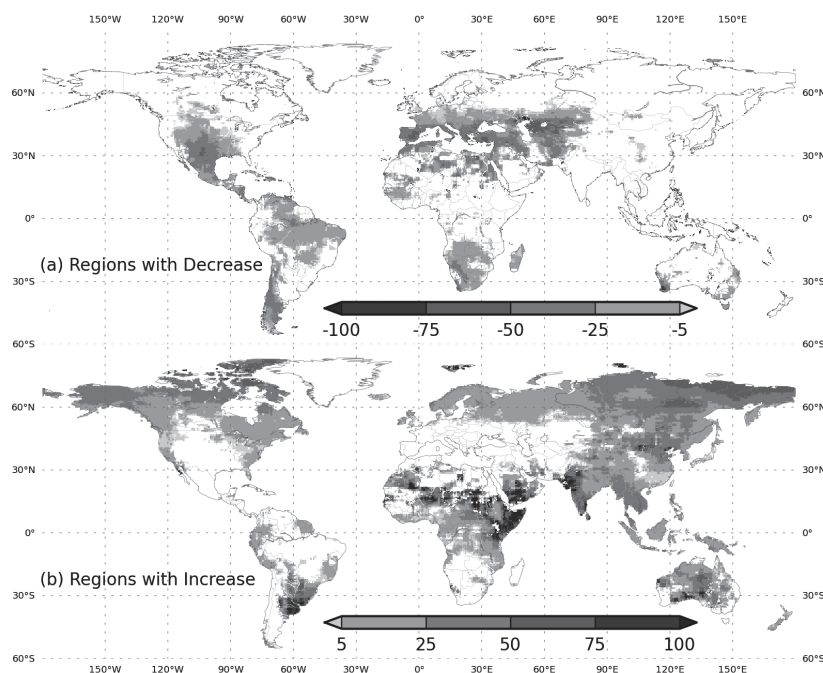


図1 地球温暖化による河川流量の将来変化(%). 上段(a)は減少する地域を、下段(b)は増加する地域を示す。「[2071~2100年平均] - [1971~2000年平均]」/「[1971~2000年平均]」を計算した結果であり、9つのGCMのマルチモデル平均値を示している。将来の気候シナリオは将来の放射強制力と地表平均気温が最も高いRCP8.5である。GCMによる地表流出量を河川モデルCaMa-Fluodで積算して河川流量に換算した。

の代表的なものを紹介したい。しかしながら、ここまでの前置きこそが重要であることを改めて述べさせていただきたい。前置きがなければ、単に「インドは水が増えることでしょう。地中海沿岸は水が減ることでしょう。」というような結果の羅列に留まってしまい、直観による占いを並べたのと変わらない記述に終始してしまうからである。

図1は、将来の水資源賦存量の変化をCMIP5の複数のモデル出力から計算、図化したものである。ここでの水資源賦存量とは、長期間平均（分かりやすく言えば、年平均とと考えていただいで差し支えない）の河川流量のことである。「降水量－蒸発量」を全球河道網に沿って集計したものともいえる。すべての計算条件がまったく同一ということにはならないであろうが、ほぼ同一のCMIP5ベースでの将来流出量の変化の図は、これから様々な論文等で見かけることだろうと思われる。

この図1はAR5向けのCMIP5の出力から作ったとはいえ、その概略はAR4向けのCMIP3の出力から作ったものと、定性的にはほぼ同じである。たとえばAR4/WG2の第3章¹⁾では、そのFigure 3.4とFigure 3.8として類似の図が示されている。そういった意味では、つまり地球温暖化予測の表面的な進展だけを見た場合は、本論文のサブタイトルにもなっている「AR4からAR5」へは大きな変化はないともいえる。表面ではないところでの数々の変化は、この小文の至る処で紹介を行っているつもりである。

特徴のいくつかを述べると、1)トルコやカスピ海周辺を含む地中海沿岸全域が乾燥化する（水資源賦存量が減少する）、2)アメリカ中西部からメキシコにかけての1帯が乾燥化する、3)カナダやロシアの大半の地域やフィンランド、スウェーデンなど北半球寒冷域は広域にわたって湿潤化する、4)北アメリカ東海岸から北東部はどちらかといえば湿潤化する、5)東アフリカは湿潤化、6)東アジア、東南アジア、南アジアは年間の総量としては湿潤化傾向を示すが、さらに詳しく見た場合、雨季の湿潤化と乾季の乾燥化という望ましくない事態が同時に生じそうである。全体としても、すでに水が十分ある地域と季節の水量が増え、水が不足がちな地域と季節の水量が減るという見通しが得られることになる。上で述べた主だった乾燥化する地域は、世界的な農業地域、穀倉地帯でもある。ある種の果物の生産などを除き、乾燥化が好ましいとは思えない。

4.2 雪水に関わる変化

ところで、温暖化といえば、雪や氷についての変化を無視し得ないだろうというのは、誰もが思いつくところである。温暖化による代表的な影響としては、融雪時期が早まり、それによる流出のピークが早まる。AR4では、世界の様々な河川において今後数十年から百年のうちに、融雪流出ピークが半月から一月程度は早まるであろうと記述されている。仮に冬場の総降水量がほぼ同じであったとしても、気温上昇のせいで雪として降らずに雨として降る量が増える。これは積雪量を減らし、融雪時のピーク流出を減少させる方向の影響を持つ。ただし、気温の上昇にともなって大気中の水蒸気量が増え、冬場の降水量そのものが増えるかもしれない、最終的に融雪流出が減るか増えるか、融雪ピークが大きくなるか小

さくなるかについては一概に言えない。地域毎に異なるし、地域毎の予測は容易ではない。ピークの全球的な早まりのみが明らかであるとされている。融雪洪水時期のずれによる被害や、融雪水の減少による春の農業用水の不足なども懸念されている。また、ピークの早期化は、融雪ピーク後の夏場の低流量の時期、いわゆる夏渇水の時期が長期化する恐れにもつながる。図1やその類似の図表は残念ながら、これらの心配事に対する情報はあまり与えてくれない。

温暖化にともなう氷河の急激な縮退と消滅や、氷河湖の形成とその決壊による洪水の増加の恐れも深刻である。南極とグリーンランド氷床を除く陸上の氷河が21世紀中に溶ける量は、将来の海面上昇の10～20cmに相当すると見積もられている。氷河下流の河川では、氷河融解量の増加により夏季の渇水流量が上昇傾向にある所も多いが、それらは将来氷河が消失した途端に急激な減少に転じることが懸念される。とくに、アジアでは乾燥地域の水資源に壊滅的なダメージを与える可能性がある。たとえばブラマプトラ川とインダス川では、温暖化による氷河消失が河川流量（とそれを用いた灌漑）へ与える影響により、数千万人分の食糧生産への影響が危惧されると指摘されている。こういった過去数十年から将来百年の氷河の変化の推計は、この数年で急速に進展しつつある研究分野であり、これからの数年で次々と新たな知見が得られることであろう。観測データが不十分であるため温暖化による将来の影響を見積もるのは現段階で困難であるが、凍土の融解が地下水や生態環境に与える影響も、シベリアやアラスカなどでは危惧される。

4.3 極端現象の変化

洪水や渇水といった極端現象の変化は図1で示される平均的な変化の様相と類似の部分もあるものの、異なる部分もある。たとえば、東南アジアと南アジアの多くの地域、サヘル、南米の多くの地域、アメリカ東海岸、西ヨーロッパなどが、洪水と渇水のどちらもが酷くなる地域として予見されている^{3,18)}。このように両方が酷くなる地域は、融雪の件と同様に図1だけからは読み取れない。残念ながら、人間活動の盛んな地域と洪水渇水が両方酷くなる地域とは、結構な確率で一致しそうである。

台風常襲地域に住む我々にとって、温暖化による熱帯低気圧活動の変化は重大な関心事である。SREXによるサマリーは以下のとおりである。a) 過去数十年のいかなる熱帯低気圧活動の長期的増加傾向も、その信頼性は低い（観測システムやデータの継続性に問題があるため）。b) これまでの熱帯低気圧活動の変化が人為起源であると説明することは難しい（人為起源でないと説明することも難しい）。c) 熱帯低気圧の数は、将来、減るか変わらないだろう（可能性は高い=likely=66-90%）。d) 熱帯低気圧にともなう大雨は将来、増加するであろう（可能性は高い）。しかし、気温の上昇や一般的な大雨の変化についてはAR4やSREX等においても、曲りなりにも定量的な情報が示されているのとは対照的に、熱帯低気圧の変化については定性的な見通しの記述に限定されているというのが現状である。

極端現象について、もう一つ頭に置いておかねばならないことは、現象の強さや大きさだけが問題ではない点である。別の言い方をすれば、ある定まった大きさの極

端現象が生じたとしても、その発生・通過場所や時期・季節によって、被害はまったく異なる。ハリケーン・カトリーナは被害額の面では歴史上、抜きん出た第一位の水災害であるが、ハリケーンそのものが史上最大級だったわけではない。通ったコースの特殊性と受け止めた地域社会の脆弱性および金銭的豊かさが、歴史上最高の被害額へと導いてしまったわけである。こういった当たり前のことも、IPCCとしてはSREXにおいて初めて整理され、目に付く形で記述された。このような、物理的要素が極めて極端ということではなく、場所や時期などの組み合わせによって影響だけが著しい極端現象として現れるものについては、GCM→影響評価モデルといったトップダウン型の研究だけでは扱いにくい。SREXの第5章以降で扱われているようなボトムアップ型の研究や、SREXの第9章（ケース・スタディ）のようなLessons Learned型の研究にも着目すべきであろう。

5. 結びに代えて

本稿では、いわゆる地球温暖化による水循環の変化について、現時点での知見や情報の代表的なものを記述させていただいた。本稿全体がまとめのようなものであるため、ここでは結論やまとめは敢えて記さない。一方で、紙幅の都合上あるいは私の知識の限界から本稿では詳しく記せなかったいくつかの内容について、以下の2つの段落ではキーワードと短い説明を加えさせていただく。また、白黒のためもあるが、図の数が少なく文字ばかりになった点をご容赦いただきたい。

まず、過去や将来の気候の変化に関して、エアロゾルに起因する変化が注目されているということである。次に、過去のトレンドや昨今の特定のイベントの要因を特定できるかという研究（Detection and Attributionのこともあれば、Event Attributionのこともある）が、ますます盛んになっている。たとえば、今年の九州の梅雨期の大雨は温暖化のせいなのであろうか？たとえば、今年のアメリカの大干ばつは温暖化のせいなのであろうか？そういった問いに答えていこうというものである。また、津波と原発の事故以来、想定外という言葉をしばしば目にする日々ではあるが、気候変化の問題においてもTipping Point¹⁹⁾やCritical Level, Critical Riskなどについて、以前からも議論が行われてきた。これらについても、ますます研究が進展することであろう。たとえば、どの程度の水循環の変化が社会にとってUnacceptableであるか？変化の「予測」の研究は多々あれ、そういったUnacceptableについての検討は、これからである。著者らも、今後の世界の洪水被害人口がどのような推移するかの簡単な推計を試みたことがあるが²⁰⁾、その被害の増加が社会にとってどのような意味を持つかの判断の難しさを感じた。

20年程度先の近い将来においては気候モデルの持つ不確実性や気候モデルの選択が不確実性の第一の要因となると上の方で記述したが、AR5/WG1およびCMIP5では新たに、近未来予測という分野が加わる。これは、大気や海洋の状態を適切に初期化することによって、今後の20～30年の気候を予測しようというものであり、10年後の1月1日の天気を当てるという意味ではないものの、単なるProjectionというよりは「予測」の性

質を持ったものである。たまたまかもしれないが、この20～30年というスパンは、インフラ整備のスパンとも一致する。これは、気候学において出現しつつある10年規模予測（Decadal Prediction）という研究分野²¹⁾に対応するものである。WG1においては重要な研究の一分野を占め始めた近未来予測・10年規模予測であるが、WG2の水循環や水資源分野では、どのように利用していけばよいのか、まだまだ手探りの状態である。

最後に、結局のところ皆さんが知りたいことは、たとえば次のようなことではないか。「で、利根川とか荒川上流の水資源は温暖化でどうなるのですか？早明浦の貯水量は？定量的な見通しを教えてくださいませんか。」と。しかしながら、これに現時点で答えることは、ある種のMission Impossibleである。不確実性があまりにも大きい。気候モデルの解像度が上がりコンピュータの性能さえ上がれば自動的に答えが得られる、という性質のものではない。上で台風（熱帯低気圧）についての記述を行ったが、将来の梅雨の変化というのも同様に難題である。梅雨も台風も、さらには冬場に日本海側からの降雪も、気候システムの中では時空間スケールが小さく特徴的な大気現象であり、現代の気候モデルがまだまだ再現を不得手とする現象でもある。日本の水資源の多くは、そういった気象学・気候学的に難解な大気現象からもたらされているのである。

こういった「荒川上流の水資源の変化は？」のような問いに対しては、気候予測に基づいたトップダウン型の研究をしっかりと続けると同時に、上でも記したようにボトムアップ型の研究にもますます注目していくべきであろう。ボトムアップ型の研究では「将来の定量的予測をきっちり定めよう」というところから始めるのではなく、その地域や対象の持つ潜在的リスクや致命的な脆弱性、あるいは万一の事態が生じた際の対応力といったものを洗い出すところから開始する。これは、社会基盤に関わる工学が本来的に備えている方法論のはずである。

謝辞

本論文の作成にはJST/CREST「世界の持続可能な水利用の長期ビジョン作成」、最先端・次世代研究開発支援プロジェクト「山岳氷河の融解が世界の水資源逼迫に与える影響」、環境省地球環境研究総合推進費（S-10）ならびに文部科学省気候変動適応研究推進プログラムから支援を受けた。

参考文献

- 1) Kundzewicz, Z. W. and Coauthors (2007) Freshwater resources and their management. In: Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability, pp.173-210, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- 2) IPCC (2012) Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 582pp, Cambridge, UK, and New York, USA.
- 3) Seneviratne, S. I. and Coauthors (2012) Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. In: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. Cambridge University Press, pp.109-230, Cambridge, UK, and New York,

- USA.
- 4) 花崎直太, 松久幸敬, 長谷川安代訳 (2009) “気候変動2007: 影響, 適応と脆弱性”. 気候変動に関する政府間パネルの第4次評価報告書に対する第2作業部会の報告, 第3章淡水資源とその管理, pp.111-153, (独国立環境研究所, 茨城).
 - 5) Kanae, S., Hirabayashi, Y., Yamada, T. and Oki, T. (2006) Influence of "realistic" land-surface wetness on predictability of seasonal precipitation in boreal summer, *J. Climate*, **19**, 1450-1460.
 - 6) Haddeland, I. and Coauthors (2011) Multimodel estimate of the global terrestrial water balance: setup and first results, *J. Hydrometeorol.*, **12**, 869-884.
 - 7) <http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/GSWP3> (2012年8月現在).
 - 8) Ranjan, P., Kazama, S., Sawamoto, M. and Sana, A. (2009) Global scale evaluation of coastal fresh groundwater resources, *Ocean & Coastal Management*, **52**, 197-206.
 - 9) 吉川沙耶花, 山田花グレンス, 花崎直太, 鼎信次郎 (2012) 1960年から2000年の全球取水源別灌漑水供給量の推定, 環境科学会誌, in revision.
 - 10) Wada, Y. and Coauthors (2012) Past and future contribution of global groundwater depletion to sea-level rise, *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L09402, doi:10.1029/2012GL051230.
 - 11) Pokhrel, Y. N., Hanasaki, N., Yeh, P. J. F., Yamada, T. J., Kanae, S. and Oki, T. (2012) Model estimates of sea-level change due to anthropogenic impacts on terrestrial water storage, *Nature Geosci.*, **5**, 389-392, doi:10.1038/ngeo1476.
 - 12) Hanasaki, N. and Coauthors (2012) A global water resources assessment under RCP, SSP, and CMIP5 scenarios, *Hydrol. Earth Syst. Sc.*, to be submitted.
 - 13) Nakicenovic, N. and Coauthors (2000) Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 599pp, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
 - 14) Oki, T. and Kanae, S. (2006) Global hydrological cycles and world water resources, *Science*, **313**, 1068-1072.
 - 15) 鼎信次郎 (2007) 世界水資源の今後, 水環境学会誌, **30**, 332-336.
 - 16) Richard, H. Moss and Coauthors (2010) The next generation of scenarios for climate change research and assessment, *Nature*, **463**, 747-756, doi:10.1038/nature08823.
 - 17) van Vuuren and Coauthors (2011) The Representative Concentration Pathways: An overview, *Climatic Change*, **109**, 5-31.
 - 18) Hirabayashi, Y., Kanae, S., Emori, S., Oki, T. and Kimoto, M. (2008) Global projections of changing risks of floods and droughts in a changing climate, *Hydro. Sci. Journal*, **53**, 754-772.
 - 19) Lenton, T. M. and Ciscar J. C. (2012) Integrating tipping points into climate impact assessments, *Climatic Change*, Online First, DOI: 10.1007/s10584-012-0572-8.
 - 20) Hirabayashi, Y. and Kanae, S. (2009) First estimate of the future global population at risk of flooding, *Hydro. Res. Lett.*, **3**, 6-9.
 - 21) Meehl, G. A. and Coauthors (2009) Decadal Prediction, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **90**, 1467-1485.