

特集：気候変動適応研究本部における5年間の取組み

# IPCC第5次報告書を水工技術者はいかに読み解くべきか ～洪水影響評価の観点から～

深見和彦

## 1. はじめに

2013年9月から2014年4月にかけて3回に分けて開催されたIPCC（国連気候変動に関する政府間パネル）の総会において、WG1(自然科学的根拠)、WG2（影響・適応・脆弱性）、WG3（緩和策）の各作業部会毎の最新の第5次報告書(AR5)が承認・受諾され公表された。これらの報告書は英語であり、本体はWG1の場合1552頁にもわたる大部なものであるが、その政策決定者向け要約の和訳版も含め、それらの概要は既に環境省や気象庁サイトで日本語で紹介<sup>1),2)</sup>されており、それらの要点を表面的に知ることは比較的容易である。しかしながら、気候・気象学の非専門家である我々土木・水工分野の技術者が、そこに書かれていることの意味を深く理解し信頼性を評価することは決して容易ではなく、気候変動の影響予測値について、数字だけを鵜呑みにして適応策としての施設設計値を決めることは危険ですらある。

国総研気候変動適応研究本部では、複数の気候変動予測研究プロジェクトに関わり、最先端の気候変動予測研究成果をどのように水工分野の適応策検討に反映させるかの研究を実施してきた<sup>3)</sup>。その経験を踏まえつつ、本稿では、現状の気候変動予測の成果を利用する際に必ず理解しておかなければならない不確実性の問題を手がかりとして、AR5に書かれている最新の知見を理解するためのポイントを解説するとともに、降水量動向の将来予測研究の現状について、洪水への影響評価と適応策を検討する視点から紹介する。

## 2. 気候予測の不確実性

### 2.1 日々の気象予測と100年先の気候予測の違い

気候予測の不確実性を論じる前に、そもそも日々の天気予報でも誤差があるのに、なぜ100年先の気候予測ができるのか、と疑問を持つ方も多いと思う。それを理解する鍵は、気象現象が有す

るカオス性と、天気（気象）と気候の違いを理解することにある。気象とは、特定の時間と場所における大気の状態であり、その日々の予測は、例えばジェット気流がどの程度の強さでどこにあるか、という初期条件に大きく依存する。この初期条件のわずかな差異が時間とともに指数関数的に拡大する「カオス性」によって、数日先でも誤差が拡大し決定論的な予測ができなくなってしまう<sup>4)</sup>。一方、気候とは、数10年間での気象状態の統計的特性（平均、極値など）である。長期間の統計的特性を抽出することで、上記のカオス性の効果はそれ以外の短周期の自然変動特性（後述）の効果とともに減少し、長期的な平均的特性（気候値と呼ばれる）やそのトレンドが浮かび上がることになる。例えば、2090年8月10日の日平均気温や日最高気温を知ることが不可能であるが、それらの2080～2099年の20年平均値であれば、12月10日や4月10日よりも統計的に有意な差をもって暑い8月10日の気候特性が浮かび上がり、それを他の20年の期間と比較することで、気候値の変化を抽出しようとしているわけである。もちろん、100年先の気候予測に用いられる数値気候モデルは、年々の変動はあるにせよ、日本において例えば12月や4月よりも8月は確実に日平均・日最高気温が高いという季節変動を支配する気候システムの内部現象を適切に評価できることが大前提であり、その上で、CO<sub>2</sub>の増減等の外部条件の影響を考慮できるモデルとなっている。

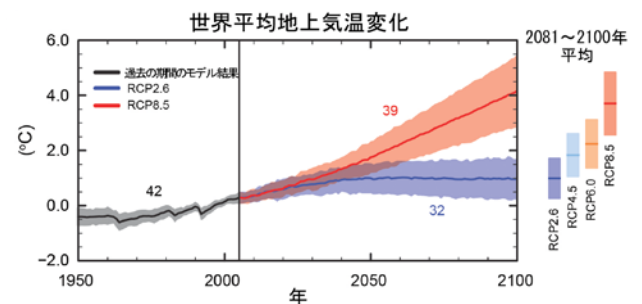


図-1 4種のRCPシナリオの下での地球温暖化予測  
※IPCC-AR5(WG1)政策決定者向け要約：図SPM.7(a)より引用

## 2.2 気候予測の不確実性をもたらす要因

IPCC-AR5(WG1)では、21世紀末までの気温上昇は0.3～4.8℃の範囲に入る可能性が高いとしており、全球（世界）年平均値の予測としてはその幅は大きい（図-1）。この不確実性の主要因として、AR5(WG1)は以下を挙げている。

- 1) 自然の変動性
- 2) 気候応答の不確実性
- 3) 温室効果ガス（GHG）やエアロゾル前駆物質の排出量及び土地利用予測の不確実性

以下、それぞれについて解説を試みる。

### 2.2.1 自然の変動性

先述の通り、日々の気象を含む気候システムはカオス性を有しており、年々変動の予測を困難とする。雪氷圏や海水条件の変動は数年単位での変動要因となる。これらの要因による全球平均気温変動は過去の全球年平均気温の年々～数年変動の幅（図-2）から見積もることができ、±0.2℃未満程度である。10年～数10年単位では特に深海の水温条件が大きな変動要因とされ、エルニーニョ・ラニーニャ（南方振動）もここに関係しており、その影響も全球年平均スケールでは±0.2℃程度とされる。これらは気候システム内部の変動要素であるが、外部からの自然変動要素としては、半年から最大3年程度影響を及ぼすとされる火山噴火（-0.1～-0.3℃の寒冷化をもたらす）の他に、11年周期の太陽活動（太陽放射照度）の変化（±0.1℃未満の影響に止まる）が挙げられる。

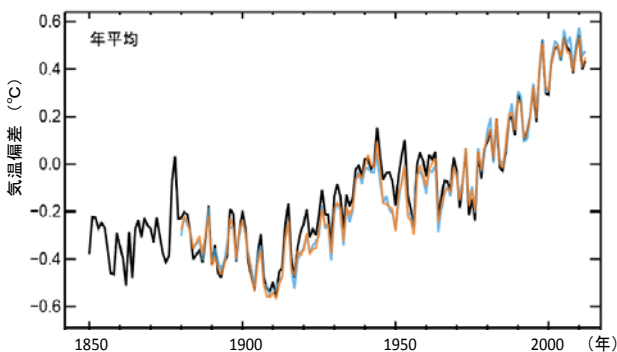


図-2 3つのデータセット（3色線）による観測された全球平均の年平均地上気温（陸域+海上）の偏差（1850～2012年）：IPCC-AR5(WG1)政策決定者向け要約：図SPM.1より一部改変して引用

なお、地球寒冷化をもたらすとされる地球公転軌道や地軸傾きの変化による軌道強制力の変化は、1～10万年スケール（ミランコヴィッチサイクル）

での変動であり、数百年スケールでの気候予測の不確実性要因にはならない。もし産業革命以降のCO<sub>2</sub>濃度の急増がなければ、地球は少しずつ寒冷化していた可能性があるが、産業革命以前の280ppmを若干上回る300ppm以上の濃度が維持されれば、今後5万年間の間に氷河期が来ることはないとAR5（WG1）は述べている。なお、2011年時点でのCO<sub>2</sub>濃度は390.5ppmである。

### 2.2.2 気候応答（モデル）の不確実性

GHG濃度や様々な自然・社会条件が、どのように気象・気候システムに影響するかの応答特性の理解やモデル化が完全ではないにことによる不確実性である。その代表例は雲－気候のフィードバックであろう。温暖化時に地球の放射収支に大きな影響を与える雲量やその高度分布の変化動向がよくわかっていない。また、雲から降水が形成される過程や植物による蒸散を含む地表面からの蒸発散特性（地表における放射・熱・水収支を規定する大気陸面相互作用）等の小規模の物理・生物・化学過程についても、これらの過程を別途直接再現するのに十分な解像度を確保する計算能力が不足しているか、それらのメカニズムの科学的理解が部分的であるために、気候予測モデルの中では近似計算（パラメタリゼーション）を行わざるを得ない状況であり、やはり不確実性（±0.5～0.7℃程度）の原因になる。なお、我々にとって特に重要な降水量予測も、降水形成過程において、いわゆる降水スキームと呼ばれる近似が必要となる典型的な事例であり、気温の予測よりも一般に不確実性が大きいと考えられている。

### 2.2.3 温室効果ガス（GHG）やエアロゾル前駆物質の排出量、および、土地利用予測の不確実性

これは社会の側の変動予測の不確実性と言える。気候変動をもたらすCO<sub>2</sub>やメタン等のGHGや、種類によって異なるが全体としては温暖化を抑制する効果があるとされるエアロゾルを形成するものとなる前駆物質の排出量の予測が不確実であれば、その効果による気候変動の予測も不確実とならざるを得ない。また、先述の大気陸面相互作用を主に規定する土地利用もその将来予測は容易ではなく、不確実性の要因となる。

IPCC-AR3、AR4（第3次および第4次報告書）では、GHG排出量や土地利用の変化をもたらす社会的・経済的な将来像に基づく予測シナリオ

(SRESシナリオ)を複数して設定していた。各エネルギー源バランス型高成長型社会(A1B)シナリオが、最も現実的に想定される標準的シナリオと認識されていたが、社会シナリオの具体的な設定の仕方によって排出量予測や土地利用変化も変化し放射強制力(温暖化をもたらす全球規模でのエネルギー収支余剰)が不明確となる面があった。このため、各シナリオ間の2.2℃の将来予測平均値の差違に対して、一つのシナリオ内でも最大4℃程度の幅が存在していた。

そこで、AR5では、社会変化シナリオではなくGHG排出量の将来における安定化レベルをまず設定し、そこに至るまでの代表的な経路を選ぶことによる代表的濃度経路シナリオ(RCPシナリオ)を先に複数準備した。主要な気候予測境界条件が迅速に明確化できるため、シナリオ間の気温将来予測平均値は、最小の低位安定化シナリオ(RCP2.6:気温上昇を2℃以下に抑える目標に基づき、今世紀末にはGHG排出量をゼロとする)と最高の高位参照シナリオ(RCP8.5:最大排出量に相当)との間で2.7℃に拡大したものの、一つのシナリオ内の幅は最大2.2℃まで抑制されているように見える(図-1)。この点は、現実に対応策実施の有無の判断をしなければならぬ水工技術者にとっては重要なポイントと考える。今我々はどのシナリオラインに沿った温暖化の途上にいるのかを正しく理解することで、どういった適応策をどの程度いつまでに実施しなければならないかが、よりはっきりするからである。適応策検討の立場からは、同一シナリオ内での予測不確実性の低減を是非期待したい。

いずれにせよ、ここに示した社会変動のシナリオ、すなわちGHG排出量における不確実性の幅は、先述の自然的要因、モデル化要因のそれに比べると非常に大きい。このことはGHG排出量が気候システムに与える影響の大きさを逆に示しており、AR5(WG1)が「気候システムの温暖化には疑う余地がない」「人間の影響が20世紀半ば以降に観測された温暖化の支配的要因であった可能性が極めて高い」と述べる自信はこれらの総合的評価によることが理解できる。

なお、全球平均の年平均気温の経年変化(図-2)を詳細にみると、1970年代半ばごろから急激に上昇している一方で、1998年から2012年の最近

15年は、その上昇に急ブレーキがかかっているように見える。いわゆるハイエイタスと呼ばれる現象であるが、地球温暖化が停滞していることを示すのではないかと近年注目された。この原因としてAR5(WG1)は自然変動性(特に海洋深層の蓄熱)および火山噴火・太陽活動の低下の2つの理由の可能性を指摘したが、さらに最近の研究成果により、後者の可能性はほぼ否定され、前者の可能性が高いという認識となっている<sup>5)</sup>ことを付記しておく。温暖化は止まっていないとの認識である。

### 3. 気候予測における降水量予測の現状と今後の課題

一般に、温暖化すると大気を含み得る飽和水蒸気量が増えるために降水量が増える「正のフィードバック」効果が働く一方、GHGの増加が対流圏上層を昇温させるために大気の安定度が増して大気循環が弱化し、降水量が減少する「負のフィードバック」効果も存在する。温暖化時に中緯度地域や湿潤な熱帯地域で大雨の頻度・強度・降水量が増加する可能性が非常に高いとする一方で、地球規模で無降雨日数が増加し干ばつの強度や継続期間が増加するのも可能性が高いというAR5(WG1)の2つの所見は、この両者の効果を背景としている。さらに北半球中緯度の陸域平均降水量が、特に1951年以降で高い確信度で増加していることも記述しているが、これは一部を除いて日本を含む北東アジアではあてはまらない。全球平均トレンドとローカルのそれが一致しない典型例である。

降水量は、そもそも空間的・時間的変動が大きく、全球スケール平均での長期的変動トレンドを論じることが難しい面がある。したがって、個別河川を包含する地域毎に長期的変動トレンドの有無を抽出・分析することが必要である。これを実現するため、一般に100~300km程度の空間解像度しかない全球スケール気候予測モデルの出力結果について、地域スケール数値気象モデルを利用してダウンスケーリング(空間詳細化)をすることが一般に行われる。文部科学省21世紀気候変動予測革新プログラムでは、気象研究所が20kmの世界最高解像度の全球気候予測モデルを開発するとともに、さらに5km解像度へのダウンスケールデータを作成しており、不確実性はあるが1時

間スケール程度までの気象現象を検討できるレベルにある。そこで、数時間以上の降雨継続時間を一般に想定する国内1級水系における年最大～治水計画規模の流域平均降水量であれば、ある程度意味のある気候変動影響を抽出できると考え、計画規模の洪水流量がどのように変化し、それが超過洪水の頻度や氾濫可能性にどのように伝播するかの研究を国総研で実施した<sup>6)</sup>。

しかしながら、5km格子モデル出力の場合、1級水系流域平均規模の降水量解析には十分でも、近年、都市水害・土砂災害等で問題となっている数分～数10分スケールの局地的なゲリラ豪雨の将来予測を行うには、それをもたらす個別の降水セルスケールを表現できないため不十分である。現在進行中の文部科学省気候変動リスク情報創生プログラムでは、2km格子モデルによるダウンスケーリング研究も進められている。極めて大きな計算機資源を必要とするが、ゲリラ豪雨等の短時間豪雨の統計的特性の将来予測の技術開発への契機となるか、今後の成果が注目される。

既に述べたように、気候予測には様々な要因による不確実性が避けられない。中でもGHG排出量・放射強制力に関連したシナリオによる違いは大きいので、RCP2.6からRCP8.5に至る各シナリオでの降水量予測を活用し、予測の最大振幅を押さえることがまず必要である。その上で、気候システムや予測モデルの不確実性の影響を低減させるため、複数モデル予測データを活用して結果の統計特性を把握するマルチモデルアンサンブル予測手法をとることが最近一般的になりつつある。大きな計算機資源を要するが、予測に含まれる誤差の幅を事前に評価し、確からしい予測値の範囲を絞り込むのにある程度有効と期待される。

その一方で、降水量予測データそのものにも含まれる不確実性の低減にも、更なる研究の進展を期待したい。降水量の時空間分布予測の精度を高めるのに鍵となる過程・状態量の探求、降水スキームの改善と適切な選択、等の研究の進展を期待したい。気候・気象予測研究者と水工技術者の間で、求める降水量の時空間スケールや許容誤差幅等の共通認識を醸成することも求められる。

なお、水工計画では、降水量等の水文量時系列による極値統計解析が一般に必要なとなるが、気候予測データは対象時期毎に通常20～25年程度の

短期時系列しか計算機資源上準備できないことが多い。限られた時系列格子データから不確実性の小さい極値を推定する手法についても研究の余地が残されていることを付記しておきたい。

#### 4. おわりに

温暖化を抑制するためには、GHG排出を減らす緩和策が必要不可欠であるが、仮にGHG排出を理想的に抑制することを前提としたRCP2.6シナリオにおいても、全球平均気温は21世紀末までに1℃程度上昇する予測であり、今後も温暖化の進行は避けられない。水分野においてもその影響を見越した適応策が必要である。その影響の出方の方向性は概ね高い確信度の成果が集まりつつあるが、予測値そのものには不確実性が含まれている。河川・水管理の現場でのモニタリングを継続しつつ、これらの変動の影響をどう評価し、後悔しないための適応策をどう進めていくかを考える必要がある。本特集の報文群はその一端を示すものである。水資源・河川環境・海岸環境等の観点での研究の現状は参考文献<sup>9)</sup>を参照頂きたい。最後に、AR5のとりまとめに携わった国内外の多くの研究者の方々のご尽力に敬意を表したい。

#### 参考文献

- 1) 気象庁IPCC紹介Webサイト：  
<http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/index.html>
- 2) 環境省IPCC第5次評価報告書紹介Webサイト：  
<http://www.env.go.jp/earth/ipcc/5th/>
- 3) 国総研気候変動研究本部：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、2013  
<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryoutnn/tnn0749.htm>
- 4) 田中博：気象予測とカオス、日本信頼性学会誌、Vol.28、No.7、pp.481-488、2006
- 5) 渡部雅浩：ハイエイタス、天気、Vol.61、No.4、pp.51～52、2014
- 6) 服部敦、板垣修、土屋修一、加藤拓磨、藤田光一：気候変動が治水施策に与える影響のマクロ評価、土木技術資料、第56巻、第12号、pp.10～13、2014

深見和彦



国土交通省国土技術政策総合研究所  
河川研究部水防災システム研究官  
(気候変動適応研究本部副本部長)  
Kazuhiko FUKAMI