

地球温暖化：最新の科学的知見

一般財団法人リモート・センシング技術センター 参与

近藤 洋輝 *Hiroki Kondo*

1. はじめに

近年、猛暑や豪雨などの異常気象の頻度あるいは強度が増大し自然災害が激化している。2015年の夏、東京では、最高気温が35℃以上の猛暑日が観測史上初めて8日連続となり、熱中症が多発した。9月には「関東・東北豪雨」による鬼怒川決壊など、甚大な災害が生じた。本稿では、このような災害の激化傾向との関連が指摘される地球温暖化の最新知見について述べる。

2. 二酸化炭素の観測値と問題の発端

1950年代より南極点やハワイ・マウナロアでは、二酸化炭素（CO₂）濃度が観測されており、岩手県綾里^{りょうり}での観測値も含めた経年変化を図1に示す。2014年までの観測では、工業化以前の1750年頃には278 ppm（1 ppm は体積比で百万分の1）であった地

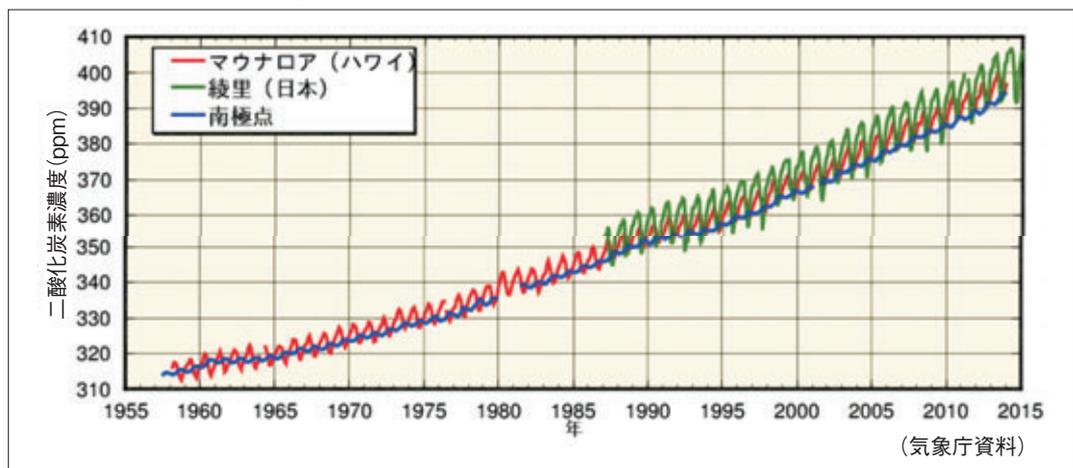
球全体の平均濃度は年々増加し、2014年の年平均値は43%増加の397.7 ppm と観測史上最大で、特に北半球の月平均値では4月に初めて400 ppm を超えている。

一方、1970年代には数値天気予報モデルの発展として、大気のバランス状態の研究開発が進み、さらに陸域や海洋の効果も取り入れた気候モデルが開発され始めた。特に CO₂ 濃度が倍増したら、温室効果^{※1}により気候がどの程度変わるかに関し、米国地球流体力学研究所（Geophysical Fluid Dynamics Laboratory：GFDL）の真鍋らによるシミュレーション結果¹⁾ が報告され、その結果、地球温暖化の可能性が指摘されて大きな反響を呼んだ。

3. IPCC による知見の集約とその意義

地球温暖化への懸念から研究成果に対する政策ニーズが増す中で、1988年気候変動

図1 観測された大気中 CO₂ 濃度の変化



※1 温室効果
太陽からの放射に対してはかなり透過させるが、暖められた地球表面からの放射に対してはほぼ吸収して温まり、地表をより高い温度でバランスさせる性質。それを有する CO₂ などの気体は温室効果ガスと呼ばれる。

に関する政府間パネル（Intergovernmental Panel on Climate Change：IPCC）が設立された。以来、IPCCは世界中の専門家の協力で、学術論文による知見の評価結果を発信している。IPCCでは、この評価報告書を1990年以来5回出している。最新の第5次評価報告書（The Fifth Assessment Report：AR5）は2013-14年に発表された。これらの報告書は、国連気候変動枠組条約（United Nations Framework Convention on Climate Change：UNFCCC）や、京都議定書に至る政策判断の基礎情報となった。さらに、2020年からの実施を目指す新たな枠組にむけた国際交渉が、2015年末のパリ会議（Conference of Parties：COP21）でパリ協定として決着したが、AR5は議論の重要な根拠となっている。

以下、最新の知見としては、主としてAR5のうち自然科学的成果に関する第1作業部会の報告書²⁾（およびその日本語訳³⁾）に依拠して解説する。第1作業部会では気候システムの観測、古気候の記録、気候の諸過程に関する理論的研究、気候モデルを用いたシミュレーションなどによる多くの科学的な分析に基づいた気候変動の新しい証拠の検討を行っている。

4. 観測からの知見

IPCCでは得られた知見から、前回の第4次評価報告書（AR4）および今回のAR5では「地球システムの温暖化は疑う余地がない」と評価するに至った。具体的にその内容を以下に示す。

なお、AR5では主要な知見の確実性の度合いについては、確信度を定性的な階級（非常に低いから非常に高いまで）で表し、可能性（ほぼありえないからほぼ確実まで）を確率的に定量化して表している。知見の妥当性に対する確信度は、証拠の種類や量、質、一貫

性および見解の一致度に基づいているが、ここでは必要な箇所のみを示す。正確には報告書を参照されたい。

(1) 大気

地上気温に関しては、1850年代から現在までに年ごとの変化や10年平均値ごとの変化でみて、20世紀後半からは明確な増加傾向が見られる（図2）。一方、1750年は歴史的に見て工業化以前の基準年と国際的にみなされているが、当時の測器観測データはなく、年輪や氷床コアなどの資料から間接的に推測するしかない。そこでAR5では、工業化がまだ低く、しかも測器観測データが世界的に存在していた1850~1900年での平均値を1750年頃の近似とみなしている。この平均値から直近値（2003~2012年の平均値）までの昇温はすでに0.78℃である。

なお、AR5の報告書では0.78 [0.72~0.85]℃と表記され、[]内の不確実性の範囲は90%の信頼区間で定量的評価がなされているが本稿では以下同様に省略する。

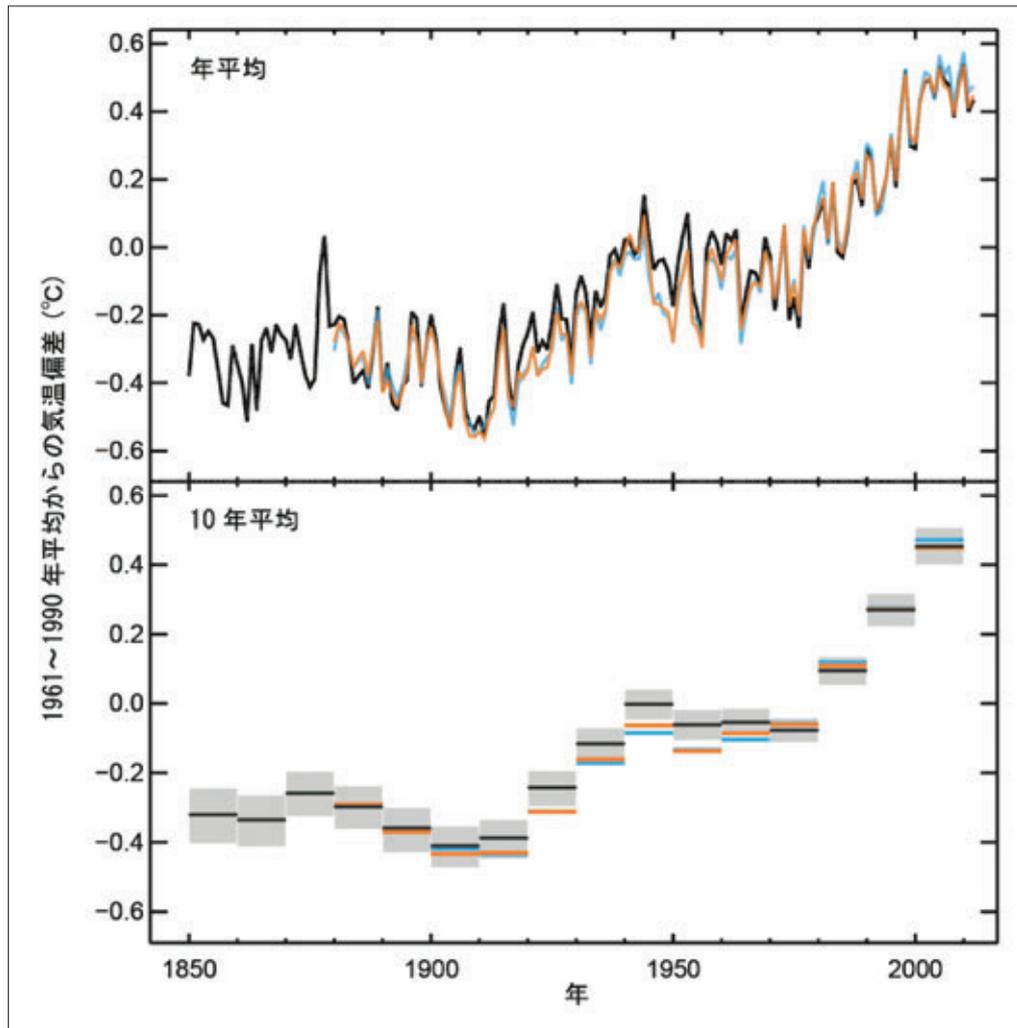
年降水量の過去110年間の10年あたりの変化率の平均を見ると、地域により降水量の増・減はばらつきが大きい。最近の60年間でそのばらつきの地域間の差が拡大している。

世界規模で寒い日や寒い夜の日数が減少し、暑い日や暑い夜の日数が増加している可能性が非常に高い。熱波の頻度はヨーロッパ、アジアおよびオーストラリアの大部分で増加している可能性が高く、また陸域では大雨現象の回数が増加した地域は減少した地域よりも多い可能性が高い。

(2) 海洋

地球温暖化の熱エネルギーはどこかに蓄積（吸収）されている。1971~2010年の40年間に於いて、気候システムにおける正味のエ

図2 観測された世界平均地上気温³⁾



色分けは用いた3つのデータセットの違いを示す。

エネルギー増加量の60%以上は海洋の表層（0～700 m）に蓄積されており、約30%は海洋の700 m以深に蓄積されている。蓄積量では、海洋は約90%を蓄積し、次は氷、陸地の順で、大気は1%程度に過ぎない（図3）。地球温暖化は海洋に圧倒的に反映している。

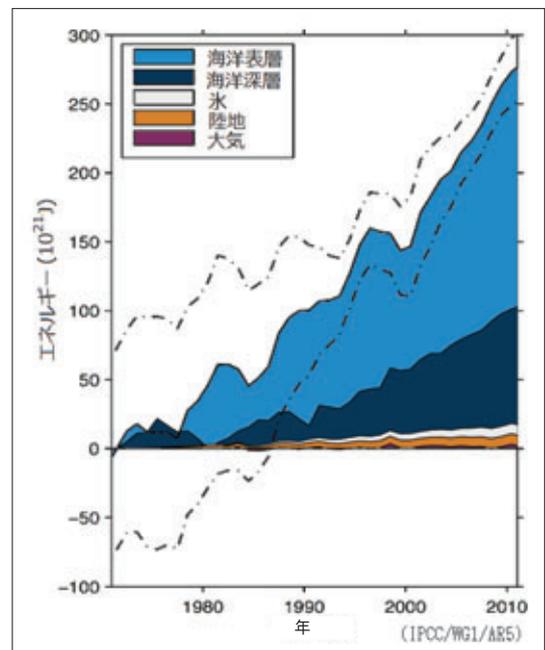
(3) 雪氷圏

北半球の春の積雪量は、有意な減少傾向にある。北極海水の面積は毎年9月が最小値となるが、その減少傾向は著しく、2012年に衛星観測史上最小を記録した（図4）。

(4) 海面水位

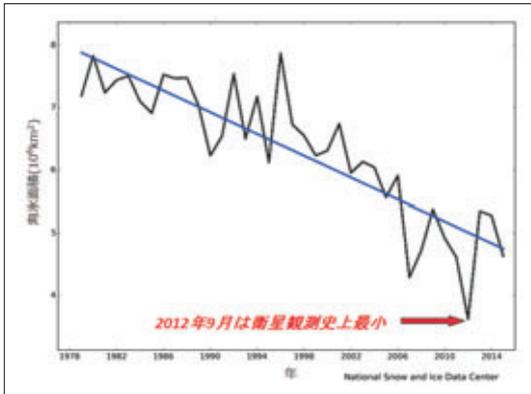
地球全体の平均海面水位は上昇が加速して

図3 蓄積された温暖化のエネルギー



一点鎖線は不確実性の範囲を示す。

図4 北極海氷の9月平均面積（1979～2015年）



いる。その要因は大きい順に、海洋熱膨張、氷河の融解、グリーンランド氷床の変化、南極氷床の変化、およびAR5で新たに示された陸域の貯水量の変化である。

(5) 温室効果ガス

主な温室効果ガスである、CO₂、メタン(CH₄)、および一酸化二窒素(N₂O)の大気中濃度は、人間活動により1750年以降全て増加している。

海洋・大気間では海洋がCO₂を吸収し、そのため海洋酸性化(pHの減少)が見られ、サンゴや一部のプランクトンへの影響が懸念されている。

5. 地球温暖化の原因特定

1750年を基準としたある時点での気候変動を進める外力として、放射強制力(Radiative Forcing: RF、単位はWm⁻²)が導入されている。RFとは、気候学における用語で、地球に出入りするエネルギーが地球の気候に対して持つ放射の大きさのことで、正のRFは温暖化、負のRFは寒冷化を起こす。RFは現場観測、遠隔測定、温室効果ガスやエアロゾルの特性、および観測される過程を表現する数値モデルを用いた計算に基づいて推定される。

AR5では、観測される温室効果ガスは、排

出物質から分類し、それらがどのような物質になりどれだけのRFが生じるかを示し、また人為起源エアロゾル(大気中微粒子)の役割もRFで表わし、排出物質の温暖化への効果を示している。

AR5では、RFの外力条件を変えたシミュレーション実験の結果をモデルグループ間で相互比較し、人為起源外力を加えない限り観測された20世紀の気温変化の再現は不可能で、自然および人為起源両方の外力を加えた場合のみ観測結果がほぼ再現されることなどから、地球温暖化の原因が人為起源の温室効果ガス濃度の増加にあることは極めて可能性が高いと評価している。

6. 気候変動の21世紀末までの将来予測

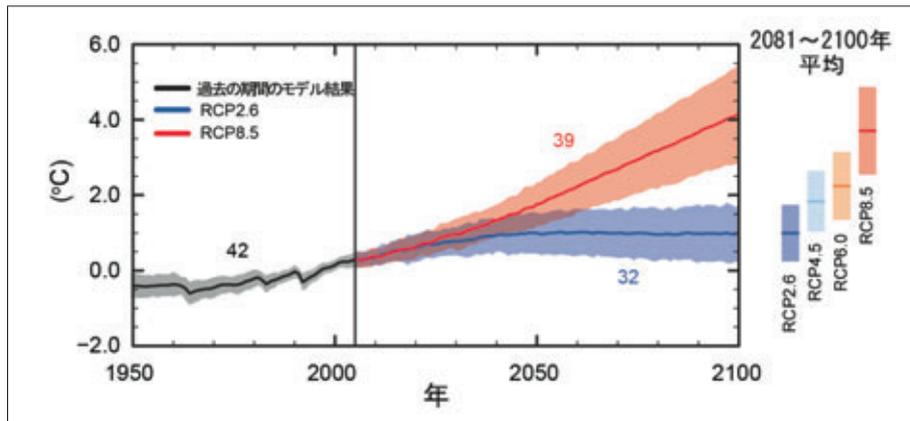
AR5では、気候システムの変化予測のシナリオは、簡略な気候モデルから、中程度に複雑なモデル、包括的な気候モデル、そして地球システムモデルまで、様々な階層の気候モデルを使ってなされている。新しい気候モデルシミュレーションでは、排出の程度に応じた代表的濃度経路(Representative Concentration Pathway: RCP)という新しいシナリオが用いられた。RCPとして4つのシナリオを仮定し、現状の活動継続の「高位参照シナリオ」(RCP8.5)のほか、政策介入による高位(RCP6.0)、中位(RCP4.5)、低位(RCP2.6)の3つの安定化シナリオの下での、各国の気候モデルによる予測実験結果の比較研究プロジェクトが実施された。日本は文部科学省のプログラムの下、地球シミュレータ^{※2}の活用から先端的成果を出すなど大きく貢献した。以下、主要な予測結果を示す。

(1) 大気

図5は、1986～2005年を基準年(その平

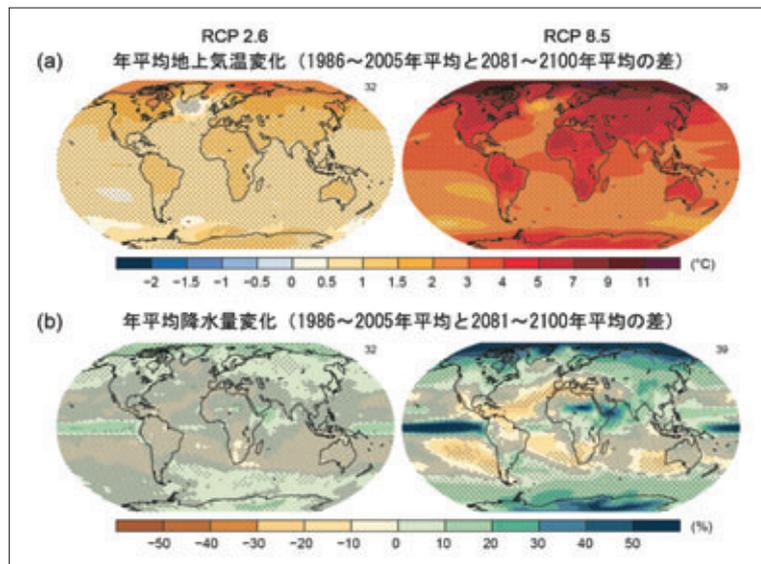
※2 地球シミュレータ
海洋研究開発機構に2002年導入されたスパコン。1秒当たりの演算数は当初世界最速の40兆回で、その後2回更新され、現在1300兆回である。

図5 世界平均地上気温の変化³⁾



1986—2005年の平均からの偏差で表示
 黒い実線：観測値、灰色帯：最少と最大の範囲
 赤色帯及び青色帯：RCP8.5および2.6の予測結果
 右端の棒は各シナリオごとの21世紀末20年平均値の予測幅
 グラフ中の数字はモデル数、実線はそれらの結果の平均

図6 地上気温 (a) および降水量 (b) の変化の世界分布³⁾



左<RCP2.6> 右<RCP8.5>に対する20世紀末の1995年前後<1986-2005>から21世紀末<2081-2100年>までの変化
 各地図の右上の数字はモデル数

均気温が縦軸のゼロ点) とし、世界平均地上気温変化に関する再現・予測の実験結果を示している。工業化以前(1750年)の気温を1850~1900年の平均で近似すると、それから上記予測の基準年までは、すでに0.61℃上昇している。これを踏まえると：

- 工業化以前から21世紀末までの上昇量の予測は、RCP2.6：0.9~2.3℃、RCP4.5：1.7~3.2℃、RCP6.0：2.0~3.7℃、RCP8.5：3.2~5.4℃である。RCP2.6以外は1.5℃を超え、RCP6.0とRCP8.5では2℃を超

える可能性が高い。

- 昇温は北極域で最大となり、海洋域より陸域で大きい(図6)。
- 極端な高温がほとんどの陸域で日々および季節の時間規模でより頻繁になり、極端な低温が減少することはほぼ確実である。熱波の頻度が増加し、より長く続く可能性が非常に高い。
- 地球全体的な水循環の変化は一様ではない。湿潤域と乾燥域、雨季と乾季の間の降水の対照性が増大するだろう(図6)。

- ・中緯度の陸域のほとんどと湿潤な熱帯域において、極端な降水がより強く、より頻繁になる可能性が非常に高い（図6）。
- ・モンスーン（梅雨など）の領域は拡大する可能性が高い。風は弱くなるが、降水は強まる可能性が高い。モンスーンの雨季の開始は早まるかあるいは変化しない可能性が高いが、終了期は遅くなり多くの地域で長期の可能性が高い。

上記知見は、今後気象災害に関し、想定外の頻度・規模への備えや再現期間の見直しが必要となることを示しているといえる。

(2) 海洋

世界平均で海洋は21世紀において昇温し続けるであろう。熱エネルギーは海面から海洋深層に広がり、海洋循環に影響するであろう。21世紀末までの海洋の水深100 mまでは、海水温上昇予測は約0.6℃（RCP2.6シナリオ）から約2.0℃（RCP8.5シナリオ）である。

海洋による炭素の吸収は、海洋の酸性化を増大させ pH 値減少の進行が予測される。

(3) 雪氷圏

21世紀を通して北極海氷は、面積が縮小し厚さが薄くなり続ける。RCP8.5では、今世紀半ばの9月にはほとんど海氷の存在しない状態が現実化する可能性が高い。

(4) 海面水位

地域的に一様ではないが、世界平均では21世紀を通して上昇傾向が続き、特に海水温の増大、氷河・氷床の融解・流出増加などにより、全ての RCP シナリオで海面の上昇率が、これまで観測された値を超える、つまり加速することは非常に可能性が高い。

7. 長期的な気候変化

AR5では21世紀後も含め昇温量は、どの RCP シナリオでも1870年を起点とした CO₂ 累積排出量にほぼ比例することがわかった。長期的には、途中で CO₂ 排出が停止したとしても数世紀に渡り地球温暖化は持続するだろう。一定の値を超える気温上昇が持続すると、千年以上の長期間にグリーンランド氷床がほぼ完全に消失し、7 m に及ぶ海面上昇をもたらす。

8. おわりに

地球温暖化には上記のほか、その影響・適応・脆弱性の課題があり、AR5では生命財産に加え、生態系など多様な「価値あるもの」のリスクに焦点を当てている。更に緩和策の課題もあり、気候モデルからの予測に加え、地球全体的なバランスからの簡易モデルによる多数のシナリオでの予測結果も加味して、排出削減の可能性が示されている。パリ協定で、工業化以来の昇温量を2℃で抑える目標に合意は得られたが、排出量が RCP8.5に沿う勢いの現実下で各国提示の自国削減目標だけでは達成は困難を伴う。今後が注目される。

参考文献

- 1) Manabe, S and R. T. Wetherald : The effects of doubling CO₂ concentration on the climate of a general circulation model. J. Atmos. Sci. 32, 3-15.1975.
- 2) IPCC [Stocker, T.F., et al.] : Climate Change 2013 : The physical Science Basis ; Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the IPCC, Cambridge University Press, Cambridge, U.K and New York, NY, USA, 1535 pp, 2013.
- 3) 気象庁：気候変動2013自然科学的根拠 政策決定者向け要約, 2015. http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/ipcc_ar5_wg1_spm_jpn.pdf

◎人どう●ふるき

新潟県出身。東大理学部物理学科卒業、同大学大学院（地球物理学）修了、気象庁予報部数値予報班、イリノイ大学客員研究員、気象大学校講師、WMO 上級科学官、気象庁海洋課長、気象研究所気候研究部長、JAMSTEC 上席特任研究員、RESTEC 特任首席研究員、2015年から現職。