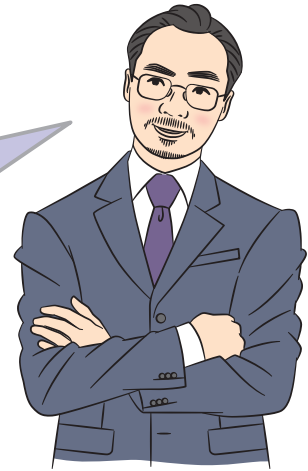


地球温暖化の予測は正しいか？

大型計算機によるシミュレーション計算では、急速な地球温暖化が予測されている。だが、「観測による推計」では、もっと緩やかな温暖化が予測されている。本当のところはいったいどうなのだろうか。「観測による推計」について紹介し、その意味を探る。



杉山 大志 *SUGIYAMA Taishi*

一般社団法人 キヤノングローバル戦略研究所 上席研究員

外れた大循環モデル(GCM)シミュレーションの予測

IPCCの温暖化予測は、大型計算機による大気・海洋結合大循環モデル(Global Circulation Model, GCM)によるシミュレーションに多くを依存してきた。

しかし21世紀に入ってからIPCCが第5次報告を出した2013年までの間、かつてGCMが予言したのに比べて、温暖化はあまり起きなかった。これはハイエイタス(=停滞)現象と呼ばれている。図1(a)において、黒の実線が観測値で、「models」とあるのはGCMによる温度上昇予測である。観測値はGCMによる予測値の下限ギリギリに位置していて、ほとんどの予測値は観測値よりかなり高かった。つまり温暖化を過大評価していた。

ハイエイタス現象の原因についてIPCCは、海洋の熱吸収が大きかった、太陽放射が減少した、エアロゾルによる冷却化が大きかった、などのいくつかの理由を挙げているが、よくわかっていないとしている(IPCC第5次評価報告書第1部会報告(以下、IPCCないしIPCC AR5と略す)、2013年、Box 9.2 p769)。

ハイエイタス現象を受けて、IPCC AR5では、専門家判断(expert assessment: IPCC AR5 p1010)によって、2015～2035年の温度上昇予測をGCMの計算値より下方に修正している。図1(b)では、黒の実線が観測値で、灰色の網ふせがGCMによる予測で、赤い斜線部が(あらゆる排出量予測に対応する)IPCCの専門家判断である。

整合性の観点から議論の余地があるのは、このように2030年頃までの予測は下方修正しているのに、

2100年までの予測については下方修正していないことである。非常に有名で、パリ協定の濃度目標・排出目標の設定にも大きな影響を与えた図2も下方修正はしていない。IPCCはこの理由を、十分な科学的理解を欠くためである、としている*1。

気候感度(ECSとTCR)と温度上昇の「観測による推計」

温暖化の予測は、GCMを用いなくても、観測データから推計することができる。この手法は観測(observational)による推計と自称されているが、IPCCでは「instrumental」(測定器による推計)として紹介されている。本稿では「観測による推計」と呼ぶことにする。

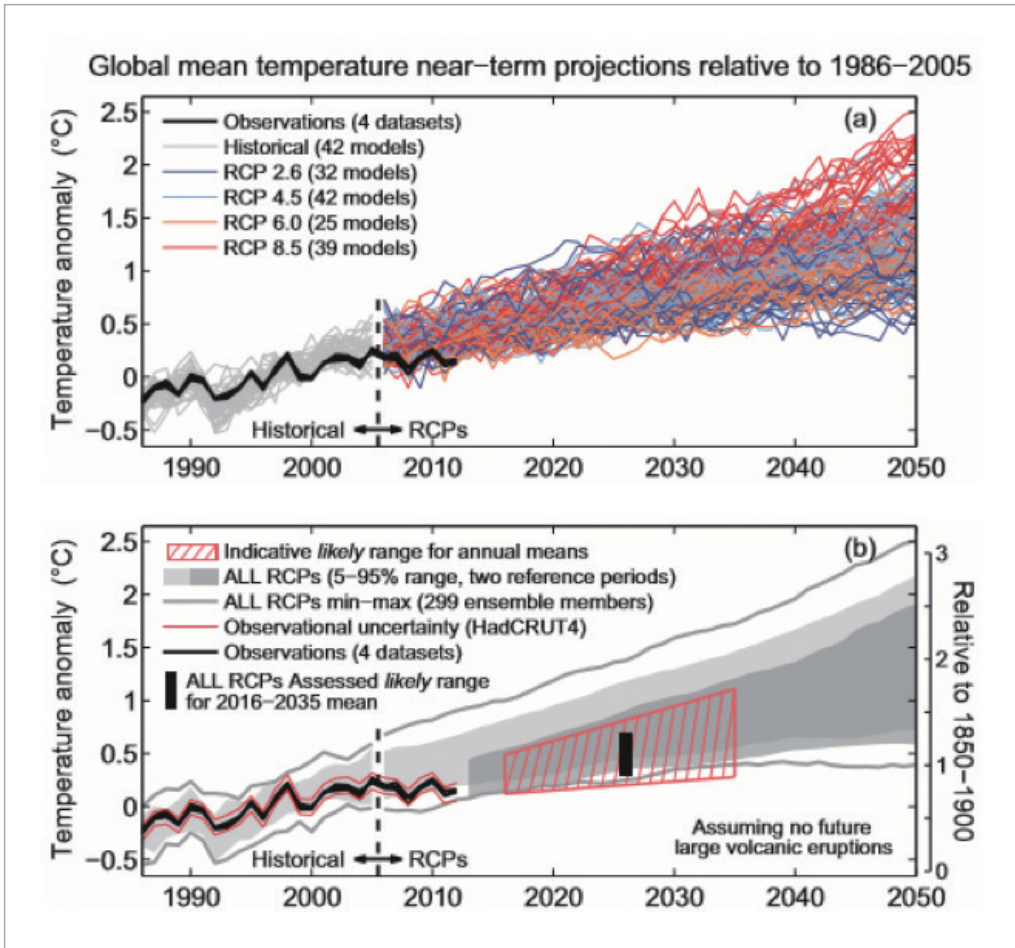
この「観測による推計」の概要を紹介しよう。

気候システム(および気候モデル)の特徴を理解するための指標として、以下の二つが提案されてよく研究されている。

- **ECS (Equilibrium Climate Sensitivity, 平衡気候感度)**: 温室効果ガス濃度を倍増した場合の平衡状態における温度上昇
- **TCR (Transient Climate Response, 過渡的気候応答)**: 温室効果ガス濃度を70年かけて倍増した場合の70年目の温度上昇

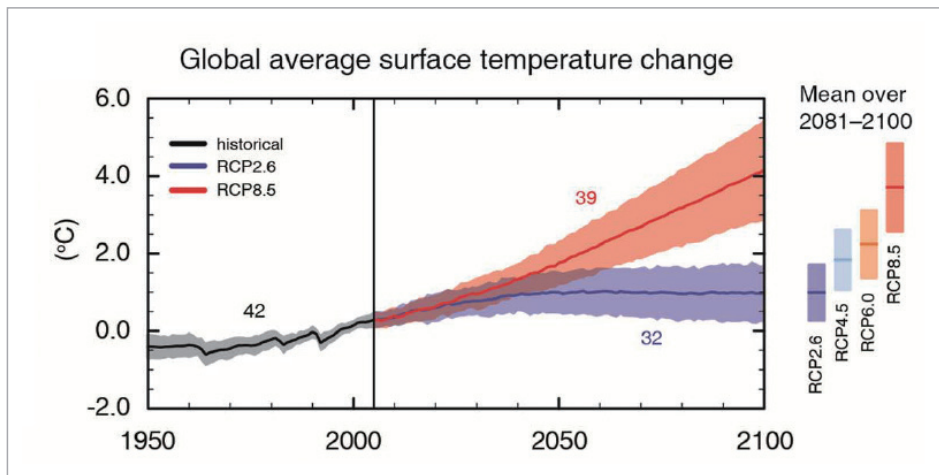
※注: 温室効果ガス濃度は産業革命前を基準として測る。海洋の熱吸収は極めて緩慢なため、平衡状態に達するためには1,000年以上かかる。過渡的気候応答は気候

図1 / IPCCの温暖化予測



注：図(a)でRCP2.5～RCP8.5とあるのは、放射強制力（温室効果ガスの排出の結果として生じる温室効果の強さ）が2.5～8.5（W/m²）に達するシナリオを意味している。RCPはReference Concentration Pathwayの略だが、単に放射強制力のシナリオだと思っておけばよい。この図はRCP2.5から8.5まで、あらゆる排出量予測に対する温度上昇をまとめて表示している。

図2 / 地球の平均温度の予測 (IPCC)



モデルでは年率1%の温室効果ガス濃度増大を仮定して計算する。年率1%で70年間増加するとほぼ倍増になる。日本語ではAR5のテクニカルサマリーの邦訳*2を参照。

以下ではまず式を手身近に紹介し、詳しい内容は数値例とともに説明する。

ECSは次の式を満たすことが知られている。これはエ

ネルギーバランスの式である。

$$ECS = F_{2x} \times \frac{\Delta T}{(\Delta F - \Delta Q)} \quad \dots \textcircled{1}$$

TCRは次の式を満たすことが知られている。

$$TCR = F_{2x} \times \frac{\Delta T}{\Delta F} \quad \dots \textcircled{2}$$

ただし、

F_{2x} : CO₂ 濃度倍増時の放射強制力 (W/m²)

ΔT : 温度の増分 (°C)

ΔF : 放射強制力の増分 (W/m²)

ΔQ : 海洋の熱吸収の増分 (W/m²)

TCRはエネルギーバランスのような明白な物理学的な意味づけはないが、気候システム及び気候モデルを特徴づける量として重要とされている。またECSのような仮想的な量ではなく、2100年頃までの温度上昇を司る、政策決定にとって重要な量である。

さて、式の具体的な意味について、数値例で概算しつつ理解していく。用いる数値はすべてIPCC AR5で整理されている観測データを活用する(なお、以下の数値例による解説はLewisらによるものを主に参考にして^{*)}。

まずTCRから。近代的なデータが整備され始めた1850年ごろを起点とすると、現在では0.8°Cほど温暖化している(図3)。

$$\Delta T = 0.8^{\circ}\text{C}$$

次に、放射強制力とは、温室効果ガスによる温暖化

の強さを1m²あたりで何Wかで表した量である。やはりIPCCの観測データによると、これは産業革命前に比べて2.29(W/m²)だけ増大したとされている。

$$\Delta F = 2.29 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

最後に、CO₂濃度が倍増したときの放射強制力(W/m²)についても、IPCCは推計値を整理して3.71(W/m²)と見積もっている。

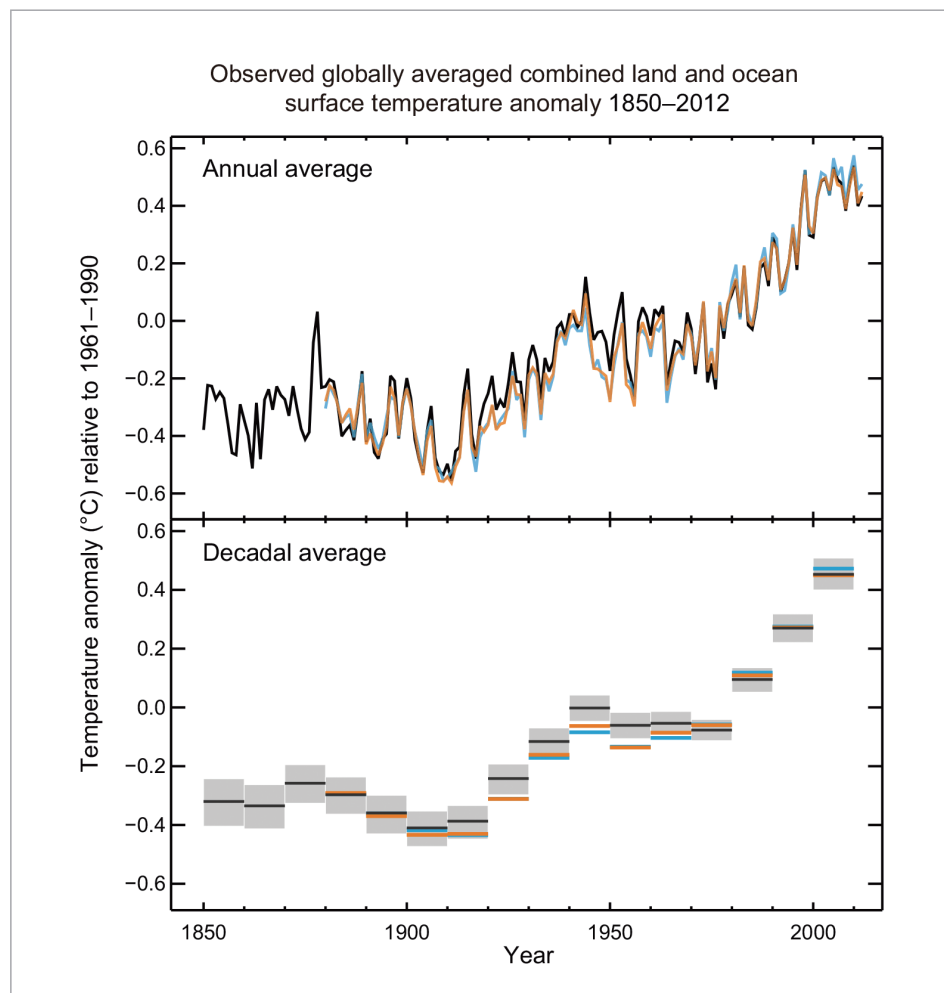
$$F_{2x} = 3.71 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

以上から、

$$\text{TCR} = 3.71 \text{ (W/m}^2\text{)} \times \frac{0.8^{\circ}\text{C}}{2.29 \text{ (W/m}^2\text{)}} = 1.30^{\circ}\text{C}$$

となる。早い話が、現時点で2.29(W/m²)の放射強制力増加によって0.8°Cの温度上昇が引き起こされているならば、将来時点でCO₂倍増にあたる3.71(W/m²)まで放射強制力が増加した場合には、0.8に対して比例的に1.30°Cの温度上昇があるという、計算上はただそれだけのことである。

図3/世界平均の温度上昇(IPCC AR5 Fig SPM.1)



次にECSである。海洋による熱吸収の推計値として $0.51 (W/m^2)$ を用いると*4

$$ECS = 3.71 (W/m^2) \times \frac{0.8^\circ C}{2.29 (W/m^2) - 0.51 (W/m^2)}$$

$$= 1.67^\circ C$$

となる。この式の意味は、CO₂ 等による温室効果（水蒸気の発生や雲のフィードバックを含む） $2.29 (W/m^2)$ のうち、海洋が $0.51 (W/m^2)$ を吸収している。その差である $2.29 - 0.51 = 1.78 (W/m^2)$ が大気を暖めて、それが $0.8^\circ C$ の温度上昇をもたらしている（そして、温度が上昇している分だけ、大気から宇宙への放熱（=正確にはプランク輻射熱）が多くなって、地球全体としてのエネルギー保存則が満たされている）。CO₂ 倍増時には、 3.71 の放射強制力が発生するので、それに対応した温度上昇であるECSは、 $0.8^\circ C$ に $3.71/1.78$ を掛けて $1.67^\circ C$ となる。

TCRを用いた21世紀末の温度上昇の概算

TCRを求めておくと、21世紀末に実現する温度上昇を機械的に概算できる。放射強制力が $2.5 \sim 8.5$ のときの温度上昇を求めるには、単に放射強制力を $F_{2x} = 3.71 W/m^2$ で割り、放射強制力をかけてやればよい。つまり

$$\Delta T = 2.5, 4.5, 6.0, 8.5 (W/m^2) \times \frac{0.8^\circ C}{2.29 (W/m^2)}$$

である。すると表1が得られる。

表1 / TCRを用いた温度上昇の概算

放射強制力 (W/m^2)	2.5	4.5	6.0	8.5
温度上昇 ($^\circ C$)	0.9	1.6	2.1	3.0

実際にはもっと細かい補正があるが、概算としてはこれでよい。表2は、細かい補正を多数加えて検討され、学術論文で発表されている温度上昇の推計である。この計算はGCMを用いず、観測データのバランスから得られたものであることに意義がある*5。表2の3列目(TCR of $1.35^\circ C$, Baseline1850-1900)の欄をみると、表1の概算で大体の傾向を捉えていることがわかる。

対照的に、GCMの結果である表2の1列目の欄(CMIPS Models, Baseline1850-1900)は、 $1.6, 2.4, 2.8, 4.3^\circ C$ と、一貫して高めの温度上昇になっていることが確認できる。

温度上昇の不確実性

さて以上ではTCR、ECSともすべて簡易化のためベスト・エスティメイト（最良な推定値）を用いて議論していたが、観測データはどれも誤差を含む。

中でも最大の誤差は、放射強制力にある。

現時点の放射強制力として $\Delta F = 2.29 (W/m^2)$ を用いてきたが、これは高めでは 3.33 、低めでは 1.13 となっている。誤差は随分大きい。式②を見ると、TCRの計算ではこれが分母に入ってくるので、TCRは大きく上振れして、高位の推定値は 2.63 となる。

この ΔF の不確実性は、ECSではさらに大きく増幅される。というのは、ECSの計算式では分母が $\Delta F - \Delta Q$ になっているから、 ΔF が小さい場合にはさらに高位の推定値は上振れするからである。計算すると表3のように、ECSの高位の推計値は 4.79 となる。

表3 / ΔF の誤差がTCRとECSに与える影響の概算

	$\Delta F (W/m^2)$	TCR ($^\circ C$)	ECS ($^\circ C$)
最良の推定値	2.29	1.30	1.67
高位の推定値	1.13	2.63	4.79
低位の推定値	3.33	0.89	1.05

表2 / 「観測による推計」とGCMによる21世紀末の温暖化予測の比較

Scenario	Warming in 2081–2100 based on:		TCR of $1.35^\circ C$		Ratio of CMIP5- to TCR-based warming
	CMIP5 models $^\circ C$	CMIP5 models $^\circ C$	1850–1900* $^\circ C$	2012 $^\circ C$	
Baseline	1850–1900	2012*	1850–1900*	2012	2012
RCP2.6	1.6	0.8	1.0	0.2	3.4×
RCP4.5	2.4	1.6	1.6	0.8	2.0×
RCP6.0	2.8	2.0	2.0	1.2	1.7×
RCP8.5	4.3	3.5	2.9	2.1	1.7×

*To minimise rounding discrepancies, $0.8^\circ C$ has been deducted from the CMIP5 global mean surface temperature projected warming from 1850–1900 (taken as representing preindustrial conditions) to obtain warming from 2012, and $0.8^\circ C$ added to the warming based on TCR from 2012 to obtain warming from 1850–1900. But the unrounded $0.76^\circ C$ temperature rise from 1850–1900 to 2012 per HadCRUT4 has been used to compute the ratios of CMIP5 model to TCR-based warming.

※「TCR of $1.35^\circ C$ 」が観測による推計。CMIPS modelsとはGCMによる推計*6

表4/ECS、TCRの推計値

		N. Lewis, J. A. Curry					
1020							
Table 4 Best estimates and uncertainty ranges for ECS and TCR using the base and final periods indicated							
Base period	Final period	ECS best estimate (K)	ECS 17-83 % range (K)	ECS 5-95 % range (K)	TCR best estimate (K)	TCR 17-83 % range (K)	TCR 5-95 % range (K)
1859-1882	1995-2011	1.64	1.25-2.45	1.05-4.05	1.33	1.05-1.80	0.90-2.50
1850-1900	1987-2011	1.67	1.25-2.60	1.00-4.75	1.31	1.00-1.80	0.85-2.55
1850-1900	1971-2011	1.56	1.10-2.60	0.90-5.40	1.22	0.90-1.80	0.75-2.70
1930-1950	1995-2011	1.72	1.15-3.15	0.90-9.45	1.33	0.95-2.00	0.80-3.30
<i>Otto et al. (2013) results for comparison</i>							
<i>1860-1879</i>	<i>2000-2009</i>	<i>2.00</i>	<i>1.50-2.80</i>	<i>1.20-3.90</i>	<i>1.33</i>	<i>1.05-1.65</i>	<i>0.90-1.95</i>
<i>1860-1879</i>	<i>1970-2009</i>	<i>1.91</i>	<i>1.30-3.05</i>	<i>0.95-5.00</i>	<i>1.36</i>	<i>0.95-1.90</i>	<i>0.75-2.55</i>

Best estimates are medians (50 % points). Ranges are stated to the nearest 0.05 K. The preferred results are shown in bold. The final two lines, in italics, show the comparable results from Otto et al. (2013) for the periods highlighted in that paper and used in AR5

※Range 17-83%は信頼区間 66%、range 5-95%は信頼区間 90%の意味

図4/ΔFの最良推定値と不確実性

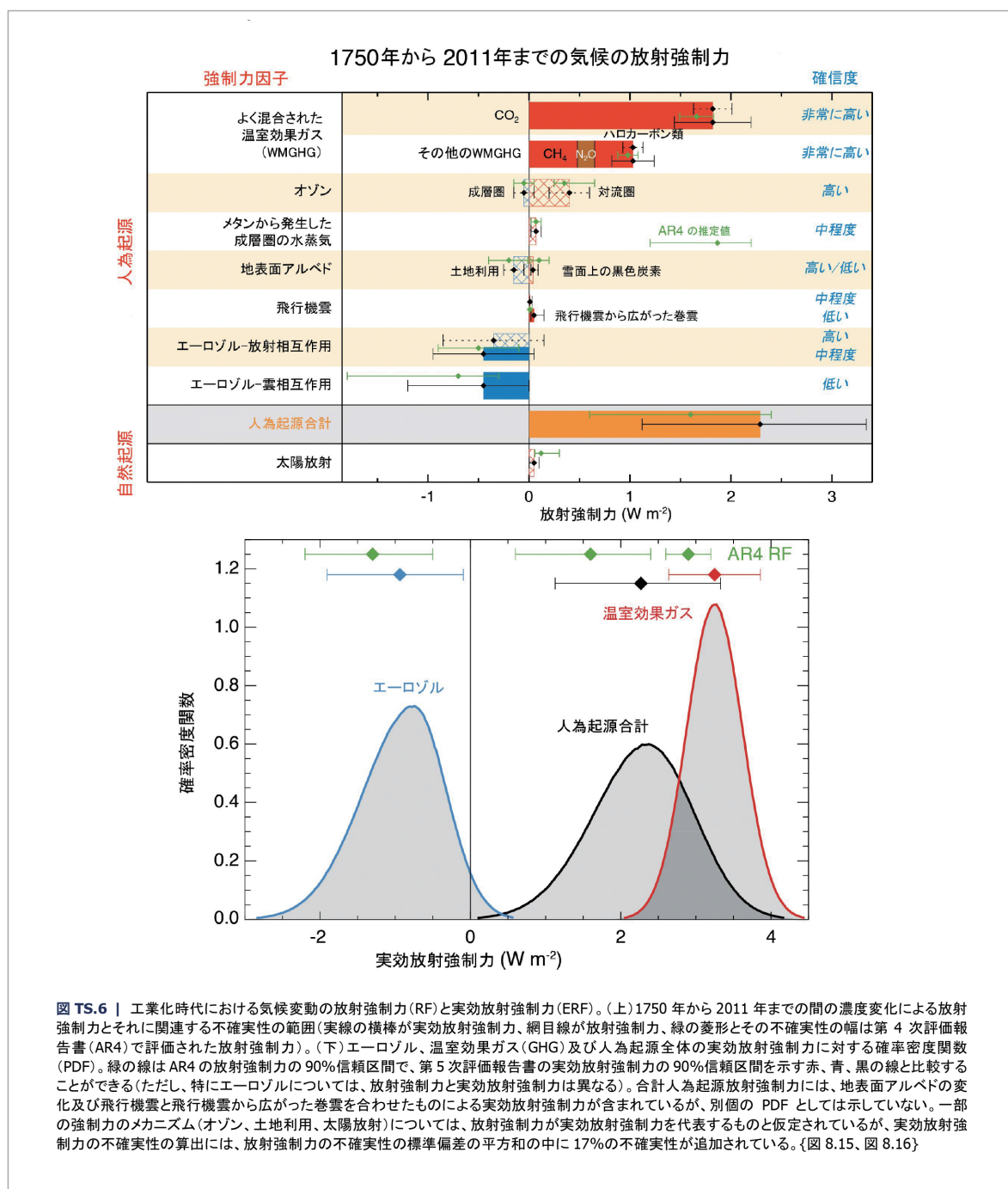


図 TS.6 | 工業化時代における気候変動の放射強制力(RF)と実効放射強制力(ERF)。(上)1750年から2011年までの間の濃度変化による放射強制力とそれに関連する不確実性の範囲(実線の横棒が実効放射強制力、網目線が放射強制力、緑の菱形とその不確実性の幅は第4次評価報告書(AR4)で評価された放射強制力)。(下)エアロゾル、温室効果ガス(GHG)及び人為起源全体の放射強制力に対する確率密度関数(PDF)。緑の線はAR4の放射強制力の90%信頼区間で、第5次評価報告書の実効放射強制力の90%信頼区間を示す赤、青、黒の線と比較することができる(ただし、特にエアロゾルについては、放射強制力と実効放射強制力は異なる)。合計人為起源放射強制力には、地表面アルベドの変化及び飛行機雲と飛行機雲から広がった巻雲を合わせたものによる実効放射強制力が含まれているが、別個のPDFとしては示していない。一部の強制力のメカニズム(オゾン、土地利用、太陽放射)については、放射強制力が実効放射強制力を代表するものと仮定されているが、実効放射強制力の不確実性の算出には、放射強制力の不確実性の標準偏差の平方和の中に17%の不確実性が追加されている。(図 8.15、図 8.16)

以上の計算にはいくつか補正が必要だが、 ΔF の不確実性がTCRの上限に影響し、それがさらにECSの上限には鋭敏に影響するという構造の本質はこれで尽きている。

TCR、ECSをより精密に計算するには、20年間ほどの基準期間 (base period) と最終期間 (final period) とを設定して、両者の差分として ΔT 、 ΔF 、 ΔQ を計算する。そのほかに細かい補正が多くある。その結果として表4が論文で公表されている*7。表3の概算で、表4の大体の傾向を捉えることができていることがわかる。

表4で、火山噴火による温度変化等の温室効果ガスによる温暖化以外の影響が少なく、基準期間から最終期間までの間隔が最も長い、1行目の太字で表示してある結果が、この論文では最良推計値であるとされている。

注：20年間程度の基準期間を設定するのは、エルニーニョなどの10年規模程度の変動を平均化するためである。期間が1850年以降に限定されているのは、温度計による信頼できる温度観測データがそれ以前には存在しないためである。

ΔF の不確実性

硫酸化物の人為起源排出によって大気中 (対流圏) にはエアロゾルが形成され、これが ΔF の推計に大きな不確実性をもたらしている。このことはIPCCがまとめている (図4)*8。

温室効果ガスの排出経路はどうか

パリ協定では温度上昇の目標を2℃以下と定めている。これはGCMの温暖化予測に基づくRCP2.6シナリオに相当し、2050年までの温室効果ガス排出をほぼ半減

し、2100年までにほぼゼロにすることを意味する。これは困難である。

だがもしも本稿で紹介したように、TCRが1.3程度であれば、RCP6.0シナリオで良くなる (表2で「2.0」となっている)。温室効果ガスの大気中濃度から排出量を逆算することは精度良くできて、IPCCの第3部会がまとめている (図5)。RCP6.0シナリオの場合、現状から排出量がやや増加し、その後ほぼ横ばいに推移することで達成できる、となっている*9。

重要なのはTCR (ECSではない)

ECSはエネルギーバランスという明確な物理的な位置づけがあり、定義がわかりやすいために、歴史的にも今日でも、頻繁に議論の遡上に上る。だがこれは、「温室効果ガス濃度を倍増し平衡状態に達したときの」温度上昇という、実現までに1,000年以上かかる仮想的な状態についての量である。

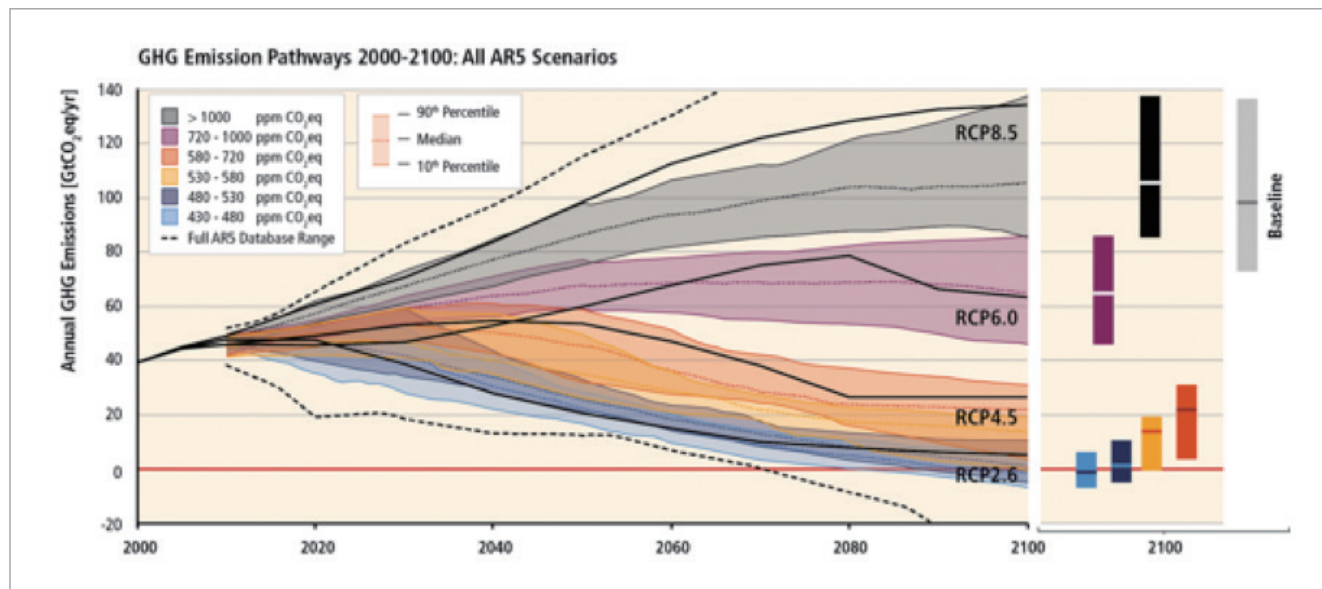
かつ、ECSは分母に不確実性が大きいもの同士の引き算 ($\Delta F - \Delta Q$ の項) が入るため、高位推計に長い裾を引く傾向になって、高い温暖化予測が現れる。だがこれは、21世紀の温暖化にはほぼ関係ない話である。

政策的に興味があるのはせいぜい2100年頃までの温度上昇である。これは専らTCRで決定されるものであり、ECSは必要ない。仮想的で、しかも不確実性がより高くならざるを得ないECSにばかり議論が集中することは好ましくない。

今後について

GCMによる計算には多くの研究者が真摯に取り組んできたし、AR5にまとめられた論文は最先端の研究ば

図5/シナリオ別の温室効果ガス排出量経路



かりである。だがそのことと、現在のGCMにどの程度予言能力が備わっているか、ということは別である*10。

本稿でのTCRを用いた温度上昇の推計を振り返ると、過去150年間において、放射強制力 ΔF が 2.29 W/m^2 まで上がったのに温度上昇 ΔT が 0.8°C に留まっていることがどうしても気になる。上述のように、TCRの式を用いて比例的に計算すれば、温度上昇 ΔT が 2.0°C になるのは放射強制力が 6.0 W/m^2 の場合である。これに相当するRCP6.0シナリオであれば、温室効果ガス排出量への制約はそれほど極端に大きくはなくなる。

ただし、このようなTCRを用いた「観測による推計」がどこまで有効かということを含めて、気候感度および将来の温度予測については今も活発な論争が続いている*11。次期のIPCC第6次報告(2020年)にどのようにまとめられるかも含め、どのように決着がつくか、予断できない。

*1 the influence of these factors on longer term projections has not been quantified due to insufficient scientific understanding. (AR5 Table SPM.2)

*2 IPCC第5次評価報告書 第1作業部会報告書 技術要約 気象庁訳
http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/ipcc_ar5_wg1_ts_jpn.pdf

*3 Nicholas Lewis and Marcel Crok (2015), A Sensitive Matter. How The IPCC Buried Evidence. Showing Good News About Global Warming. <https://www.the-gwpc.org/content/uploads/2014/02/A-Sensitive-Matter-Foreword-inc.pdf>

*4 Lewis and Curry (2015)から数値を採用した。

*5 より正確に言えば、TCRや F_{2s} の推計にはGCMが利用されるが、温度上昇 ΔT の推計には F_{2s} は効いておらず、GCMは利用されていない。

*6 Nicholas Lewis and Marcel Crok (2015), A Sensitive Matter. How The IPCC Buried Evidence. Showing Good News About Global Warming. <https://www.the-gwpc.org/content/uploads/2014/02/A-Sensitive-Matter-Foreword-inc.pdf>

*7 Lewis, N., & Curry, J. A. (2015). The implications for climate sensitivity of AR5 forcing and heat uptake estimates. *Climate Dynamics*, 45 (3-4), 1009-1023.
<https://doi.org/10.1007/s00382-014-2342-y>

*8 IPCC第5次評価報告書 第1作業部会報告書 技術要約 気象庁訳
http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/ipcc_ar5_wg1_ts_jpn.pdf

*9 気候感度が低い場合には、温室効果ガス排出への制約や温暖化対策の費用が軽減されることについては、以下を参照：茅陽一「気候感度の不確定性を考慮した排出パスの再検討」、地球環境産業技術研究機構(RITE)、2015.2.27

http://www.rite.or.jp/system/events/Kaya_ALPS_II_2015.pdf

徳重功子、佐野史典、秋元圭吾、「気候感度の最新知見からの 2°C 目標と排出経路との関係、その約束草案への含意 地球環境

産業技術研究機構(RITE)、2015年4月22日

http://www.rite.or.jp/system/latestanalysis/pdf/Climatesensitivity_2degrees_INDCs.pdf

*10 地球温暖化シミュレーションの先駆者である真鍋淑郎(1992)は以下のように述べている。「実際の気候変化と気候モデルの予測をつきあわせて慎重に評価する事が不可欠である。予測された気候と観測された気候が一致すれば、我々の気候モデルに対する自信が増すことになる」(『コンピュータによる地球温暖化の予測とその問題点』、地学会誌)

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jgeography1889/101/6/101_6_453/_pdf

*11 例えば、Nic Lewis. (2016). Updated climate sensitivity estimates.

<https://judithcurry.com/2016/04/25/updated-climate-sensitivity-estimates/>