

気候感度の下方修正とパリ合意への影響

Lowering climate sensitivity and its impact to Paris agreement

地球環境産業技術研究機構 (RITE) 山口光恒

要旨

I で IPCC 第 5 次報告 (AR5) の内容を 3 つの作業部会 (WG) 別に概観する。各 WG の主要な論点は WG1 が気候感度変更問題、WG2 が気温上昇に伴うリスクの増加問題、WG3 は 2°C 目標を巡る諸問題である。このうちでは 2°C 目標が変質したこと (従来の 2°C 安定化から 2100 年時点で 2°C を超えない目標へ、目標達成はオーバーシュートシナリオ以外はあり得ないこと) を述べると共に、2°C 達成に向けての世界半減目標は古い知見であり、8~28% の削減でよいこと、また、内容的には温暖化による損害を大きく、対策コストを小さく見せるバイアスがかかっていること、及び費用便益分析の不十分さに触れる。

II では AR5 における気候感度 (ECS) の下方修正問題に焦点を合わせ、その理由を明らかにすると共に、それにも拘わらず気温上昇別の必要排出削減率の計算に AR4 と同じく ECS3°C を用いていることを示し、その根拠となる論文の検証を行う。

III では ECS の下方修正と 2°C 目標の関係を扱う。先ず、AR5 で ECS として 3°C を用いるのは論理的必然性に乏しいこと、この場合には本年 6 月末時点で判明している各国のプレッジ (INDCs) では到底 2°C 目標には届かないことを示し、RITE モデルを用いて仮に ECS が 2.5°C であれば 2°C 目標も何とか射程圏内に入ることを示す。

IV では国際交渉が気候科学とは離れて進んでいることを 6 月の G7 サミットの 2°C 目標達成のための宣言 (2050 年排出量を IPCCAR5 が示す 2010 年比 40-70% のうち高い方を目指す) を例に示し、このままでは交渉がまとまらないか、たとえまとまっても 2°C 目標が建前に終わる事への危険性を指摘する。

上記を踏まえて、AR5 では ECS の best estimate も AR4 よりも低いと考える合理的な理由があること、仮にこれが 2.5°C であれば提出された INDCs でも 2°C 目標達成の可能性があること、さらにこの場合は限界削減費用も大幅に低下し現実性が増すことを世界のリーダーに周知せしめると共に、ECS の不確実性の大きさ (1.5~4.5°C) に鑑みて、①この幅の縮小のために ECS の見直し、②推定方式の相違で best estimate の合意ができないのであれば、ミスリードを避けるために両方を提示の上、必要削減率なども 2 種類を提示する、③上記を勘案した不確実性の下でのリスクマネジメント戦略の立案、を提案する。

I、IPCC 第 5 次報告書の概要

I-1 第 1 作業部会報告書 (WG1)

WG1 (IPCC 2013) における AR5 (第 5 次報告) と AR4 (第 4 次報告) の最大の相違点は気候感度 (ECS)¹ の下方修正である。下記はこれまでの IPCC 報告書から気候感度の部分を抜粋した表である。ここから明らかなおとおり、一旦 AR4 で上方修正されたが AR5 で元に戻り、主要な表に使われる Best Estimate については専門家の合意が得られないために AR5 では示されなかった²。

表 1: IPCC 報告書での気候感度と best estimate の推移

IPCC 報告書	出版年	気候感度	Best estimate
第 1 次報告書	1990	1.5 – 4.5 °C	2.5 °C
第 2 次報告書	1995	1.5 – 4.5 °C	2.5 °C
第 3 次報告書	2001	1.5 – 4.5 °C	2.5 °C
第 4 次報告書	2007	2.0 – 4.5 °C	3.0 °C
第 5 次報告書	2014	1.5 – 4.5 °C	Not shown

この詳細については後述するが、問題は気候感度の変更が WG1 執筆の最終段階で行われ、これがその後の WG3 の議論に大きな混乱を与えたことである。IPCC 報告書執筆は各 WG 別に先ず Zero Order Draft (ZOD、下書きに相当) を作り、内部だけのコメントに基づき First Order Draft (FOD)、さらに外部のコメントも入れて Second Order Draft (SOD)、そして Final Draft と進み、そのうちの政策決定者向け要約 (SPM) のみが政府レビューを受け、その後全ての文書を公開する手続きを踏む。WG1 の場合公開されたのは 2013 年 9 月であるが、上記の段階のうち SOD までは気候感度、Best Estimate (most likely value) とともに AR4 に同じとしていたのが、2013 年 5 月に突然上記の通り変更になった経緯がある。

他方、第 3 作業部会報告書 (WG3) では WG1 の気候感度 (Best estimate) に基づいて濃度に応じた気温上昇の程度や所定の濃度或いは気温上昇に達するための必要削減率等のモデル計算結果を使用して各種検討を行うが、WG1 が突然気候感度を変更した時点では WG3 の各種モデル比較プロジェクトはかなり進展しており、しかもそこでは WG1 の FOD や SOD に基づき気候感度の Best estimate として 3°C を用いていた。こうした中で WG1 における突然の変更 (特に Best estimate が示されなかったこと) が WG3 側に一時的な混乱をもたらしたことは IPCC のリードオーサーとして筆者自身が直接見聞しているところである (因みに WG3 が公表されたのは 7 ヶ月後の 2014 年 4 月)。

¹ ECS は“the change in global mean surface temperature at equilibrium that is caused by a doubling of the atmospheric CO₂ concentration” と定義されている (AR5/WG1/SPM p.16).

² “No best estimate for equilibrium climate sensitivity can now be given because of a lack of agreement on values across assessed lines of evidence and studies” (Footnote 16 of AR5/WG1/SPM).

このほか2°C目標達成に向けての累計CO2排出量と過去の排出量から今後許容される排出量として、目標達成確率5割以上なら1120Gt/CO2、66%以上なら1010Gt/CO2（2010年のCO2排出量のそれぞれ30年-27年分）との記述もあるが、ここではこれ以上立ち入らない。

I-2 第2作業部会報告書 (WG2)

WG2 (IPCC 2014a) は気候変動の影響、適応、脆弱性がテーマであるが、政策決定上最も重要なのが気温上昇とリスクの関係のうち5つの懸念を示す Reasons for Concern (RFC) の図である。実は同様の図は IPCC 第3次報告書 (TAR) にあったが AR4 ではアメリカ政府の反対で削除された経緯にある (Schneider 2009)。従って AR4 の図と直接比較することはできないが、TAR の図と比べると同じ気温上昇に対するリスクは明らかに上昇している。それだけではない。AR5 の RFC の基になった Smith et al. (2009) の図³と比べてもリスクは増加している。

下図はこの両者を比較したものである。

(図1) 気温上昇によるリスクの変化 (RFC、Reasons for Concern)

図 A (AR5/WG2/SPM)

図 B (Smith et al. 2009)

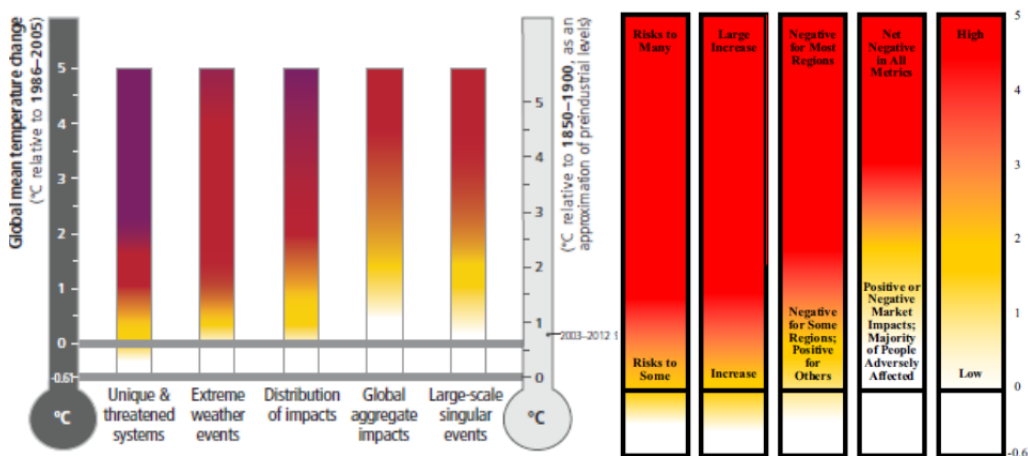


図 A は第5次報告、図 B は Smith et al. (2009) 赤が濃くなるほどリスクが大きい。図 B のカテゴリの順番は図 A に同じ。図 B の0°Cは1990年、図 A の左の目盛りの0°Cは1986-2005年なので図 B にほぼ同じ、右の目盛りの0°Cは1850-1900年なのでほぼ工業化以降の気温上昇に相当

上図のリスクカテゴリーは5つに分かれ、左から①種の多様性、②異常気象、③影響の地理的分布、④地球規模の経済的影響、⑤大規模不可逆損害となっている。リスクは白、黄、赤、紫の順で高い。両図を比べると明らかに AR5 の図 (図 A) の方がリスクが増大している。例えばカテゴリー⑤を比較すると、AR5 では工業化から2°C上昇しそれが持続或いは更に上昇を続ける場合のリスクは黄色と赤の接点あたりと評価されているが、Smith

³ AR5/WG2/Ch.19/fig.19.4 の説明によると AR5 の RFC は TAR の同様の図と Smith et al. (2009) の図を update したものと明記されている。

et al.では赤までは届かない（工業化から図 B の基点である 1990 年までには 0.6°C 気温が上昇しているの、この図の 1.4°C が工業化から 2°C 上昇に相当する）。さらに、Smith et al.にはなかった紫色（very high risk）が AR5 の図には登場している。両図とも自律的なものを除いて適応は考慮していないが、AR5/WG2/Ch.19 の説明ではこの理由（同じ気温上昇に対するリスクが AR5 で高まった理由）は上に挙げた 5 つのカテゴリーのうち①、③、⑤の 3 つについて新たに適応の限界を考慮したことにある。確かに図 A は B に比べて①と③に紫色が登場している（リスクが高くなっている）。しかしリスクの度合いは 19 章の執筆者（7 名）の価値判断とあるだけで⁴その判断根拠は示されておらず、この点不透明である。この図は対策をとらなかった場合の損害の程度を示すもので、今後の国際交渉に大きな影響を与えることを考慮すると、もっと透明性を持った判断をすべきではないかと思う。

RFC についても 1 点付言すると、ここで言っているのはリスクの程度（色が濃くなるにつれて、Moderate, High, Very high という具合にリスクが高まる）のみであって、例えば High とは何%の確率で発生するリスクかについて、況んやそのリスクがどの程度の損害を生じるかについては何の情報も提供していないという点である。このあたり今後 WG2 での更なる努力を期待するところ大である。

I-3 第 3 作業部会報告書 (WG3)

WG3 (IPCC 2014b) は緩和全般を扱うが、ここではそのうち特に本稿のテーマ（気候感度問題）と関係が深く、政策への影響が大きい 2°C 目標実現に向けた排出経路を取り上げる。対策の費用についてはこの後対策の便益との関連で簡単に取り上げる。

(表 2) 濃度・気温上昇・目標濃度達成に向けての必要削減率等

2100年濃度 (CO ₂ eq.)	オーバーシュートの有無	2050年の必要削減量(%) 2010年比	2100年の気温上昇(°C)	21世紀中に 1850-1900年比 2°Cを超えない確率	21世紀中に 1850-1900年比 3°Cを超えない確率
450 (430-480)	大半が480ppmをオーバーシュート	-72 to -41	1.5-1.7	66-100%	66-100%
500 (480-530)	No overshoot of 530 ppm CO ₂ eq.	-57 to -42	1.7-1.9	> 50-100 %	
	Overshoot of 530 ppm CO ₂ eq.	-55 to -25	1.8-2.0	33-66%	
550 (530-580)	No overshoot of 580 ppm CO ₂ eq.	-47 to -19	2.0-2.2	0 - <50%	
	Overshoot of 580 ppm CO ₂ eq.	-16 to -7	2.1-2.3		

出典：AR5 統合報告書 (IPCC 2014c) の表 (Table SPM.6) から筆者作成

上記は AR5 の濃度・気温上昇・目標濃度達成に向けての必要削減率等の表から高い濃度

⁴ The levels of risk illustrated reflect the judgments of Chapter 19 authors (AR5/WG2/Ch.19 p.1073).

の欄などを削除の上簡便化したものである。これを見ると 21 世紀中に工業化（ここでは 1850-1990 年とされている）以降の気温上昇を 66%以上の確率で 2°C以下に抑えるためには 2050 年の世界の温室効果ガス(GHG)排出量を 2010 年比で 41-72%削減の必要があり、50%以上の確率で良ければ 42-57%の削減が必要となることが分かる。これを受けて本年 6 月の G7 サミットでは AR5 を明記しつつ 40-70%のうち高い方の削減を支持するとの声明を出したことは周知の通りである（この点は後述）。AR4 でこれに相当する表は下記表 3 であるが、これを基に 2°C目標（工業化以降の気温上昇を 2°C以内に抑える目標）を前提に 2050 年世界半減目標（但し基準年は 2000 年）が唱えられた。これから分かるとおり IPCC のうちでもこの表が政策に最も大きな影響を与えている。

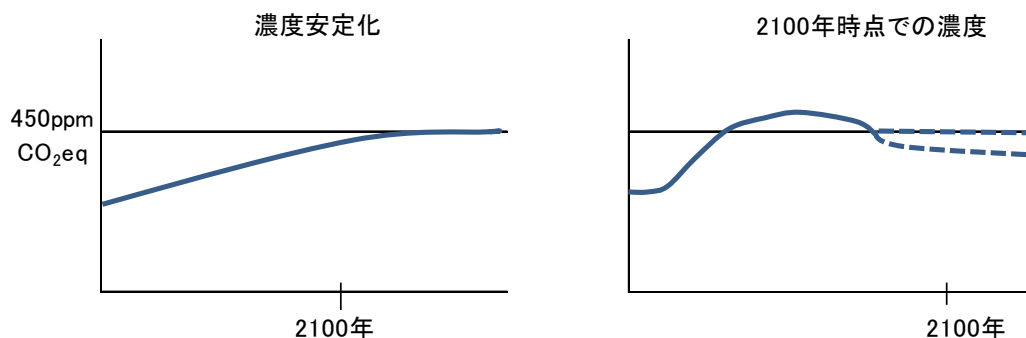
（表 3）濃度・気温上昇・目標濃度達成に向けての必要削減率等（AR4 から抜粋）

Category	均衡濃度(CO ₂ eq.)	2050年の 必要削減量(%) 2000年比	工業化以降の 均衡気温上昇 (気候感度3°Cの場合)
I	445-490	-80 to -50	2.0 to 2.4
II	490-535	-60 to -30	2.4 to 2.8
III	535-590	-30 to +5	2.8 to 3.2

表 2 と 3 は一見同種の表のように見えるが実は中身はかなり違っている。具体的には

- 1) AR5 では AR4 まで一貫して使われていた均衡濃度、均衡気温上昇という言葉が使われなくなり、2100 年時点での濃度或いは気温上昇という表現になった。この主たる理由は 2000 年から 2010 年にかけての排出量が 40Gt から 49Gt へと 23%も増加したため特に意欲的な目標（例えば 2°C目標）については 2100 年以前に目標達成に必要な濃度を一旦超えることがほぼ確実になったためである。表 2 の通り、各濃度（と言っても濃度ごとに幅があるが）にオーバーシュート有りと無しの二種類ある（450ppm は大半がオーバーシュート）。誤解を恐れずにごく簡便な図で示すと下記の通りである。

（図 2）オーバーシュート有無の場合の濃度のイラスト（450ppmCO₂e の場合）



つまり 2100 年の前に一時的に目標濃度（状況によっては気温）を超えることを許容するがその後の大幅削減により気温上昇については今世紀を通して目標値以下に抑制することを目指す戦略に転換したということである。現在の排出増を考えるとこれしか方法がないという苦肉の策であるが、これは将来世代に大幅削減を転嫁する政策に他ならない（末尾参考図 2 の灰色と青のシナリオ参照）。典型的なオーバーシュートシナリオは今世紀後半以降バイオマスをエネルギーとして使い燃焼に伴い排出される CO₂ を捕捉して地下に埋める BECCS（Bio-Energy and Carbon Capture and Storage）と、大規模な植林に頼るシナリオである点明記されている。これができなければシナリオは破綻のリスクがある

- 2) AR4 の表では気候感度として Best Estimate である 3°C を用いることが明記されていたが AR5 では単に Median estimate of MAGICC calculation を用いたとしか記述がない（にもかかわらず実際の計算には 3°C を使っている）。この点は本稿の主要テーマであるので後述する。
- 3) AR5 では表 2 の通り初めて所定の気温上昇以下に抑える確率が示された。これは今後の国際交渉に大きな示唆を与えるものである。もし 2°C 以下に収まる確率を 66% 以上にしたいのであれば目標は 450ppmCO₂e であるが、50% 以上で良ければ 500ppmCO₂e、33-66% なら 550ppmCO₂e でも目標達成が可能となる。後者の方がコストは安いわけで、どこを目指すかは 3 つの目標濃度に関する対策コストと達成確率の関係で考えればよいこととなる。
- 4) 2050 年世界半減目標が消えた。2100 年濃度を 450ppmCO₂e 以下で抑え気温上昇を 66% 以上の確率で 2°C 以下とするための 2050 年の排出削減率が 41~72% 減（基準年 2010 年）となった。仮に AR4 と同じく 2000 年基準に直すと AR5 での必要削減率は 28~66% となり、もし確率を 33~66% に落とすと 8~47% 減となる。これを AR4 の 50~85% 削減と比べると削減率が大幅に小さくなっている。この理由は上記 1) のオーバーシュートシナリオの許容にある。

I-4 温暖化対策の費用便益分析—IPCC 報告に欠けているもの

これまで述べてきた個別 WG の報告書に加えて、これらを統合した統合報告書（Synthesis report、IPCC 2014c）が発行され、これを以て AR5 の一連の報告が完結する形をとっている。しかし実態は必ずしもこうはなっていない、各 WG の記述を更に要約したものとなっている。全体を通して欠けているのは気候変動対策の費用便益分析、地球規模での他の緊急案件とのリソース配分問題である。このうち後者についてはほとんど記述がないが、前者のうちコストについてはかなりの分析がある。それによれば仮に 66% 以上の確率で 2°C 目標を達成するコストは「理想的な条件」が満たされれば 2100 年時点で GDP の 4.8%（2.9-11.4%）であるが、これは 21 世紀を通して年間 0.06%（0.04-0.14%）

の消費ロスに相当する。しかし消費そのものの成長率は年 1.6-3.0%なのでこの点を勘案するとそれほど大きなコストではない(成長率がほんの少し落ちるだけ)というものである。

ここで理想的な条件とは全ての国の参加、全ての技術が利用可能、世界共通炭素税の導入の 3 点である。実際統合報告書にも技術の利用可能性に関し、CCS (二酸化炭素捕捉・貯留) が使えない場合にはコストが 2.4 倍、バイオエネルギー供給量に制約があるときは 64%増との推測が出ている。しかし筆者から見て最大の問題は世界共通炭素税の導入で、この実現可能性は現状から見る限りほぼ皆無である。この場合コストがどの程度増えるのかについては何の記述もない。この観点から上述の GDP の 4.8%とか、消費の年率ロス 0.06%は非現実的数字である。

実はそれより問題なのは、これだけのコストをかけて気温上昇を例えば 2°C以下にとどめた場合に回避できる損害 (=便益) については全く金銭評価がないことである⁵。勿論非市場価値の計測には大きな不確実性があるが、それを理由に何の数値も無しに単に気温上昇に伴い大きな損害が生じると言い続けるだけでは、2°C目標を掲げる説得力はないし、国民にとっても納得感はない。こうした中で統合報告書完成の際のパチャウリ議長(当時)の記者会見での説明にある、①2°Cを達成するコストは経済成長率 1.6~3%を 0.06%程度下げただけである、②このコストには気候変動抑制の便益は入っていない、③対策無しの場合経済成長への悪影響が増大するとの説明のロジック⁶は受け入れられるものではない。①は非現実的条件を前提にした超楽観的なコストであり、②の便益は入っていないのではなく数値がないので入れることが不可能、③どの程度の経済的悪影響かは IPCC 報告書からは分からない、からである。

上述の説明から分かる通り IPCC 報告は筆者から見ると対策のコストは低くみせ、損害については RFC の図の変化のように客観的な指標無しに数名の専門家の価値判断でリスクを増加させるなど損害を大きく見せる傾向にある。これに拍車をかけたのがパチャウリ議長(当時)以下の執行部で、こうしたことを続けると世間から IPCC は Alarmist の集団と取られるリスクがあることを申し添える。

II、気候感度の下方修正と Best estimate

冒頭述べたとおり WG1 では最終段階近くで気候感度の likely range (66%以上) の下方修正を行い、しかも Best estimate を示せなかった。それにも拘わらず WG3 で用いた目標達成のための削減必要量の計算(本稿表 2)には AR4 と同じ Best estimate が用いられた証拠がある。従って本稿のこれまでの議論のうち気候感度が関連する箇所はすべて気候感度 3°Cを前提としており、もしこれが下方に変われば話は全く変わってくる可能性が

⁵ IPCC 2014a および同 2014c には、工業化から 2.5°C (WG2/SPM では 1986-2005 年から 2°C) 上昇の場合の損害は年間所得の 0.2~2.0%のロス(但しこれより大きくなる可能性が高い)との記述がある。これが損害についての唯一の数値であるが、これでは対策無しの場合の損害と対策後の損害の差が得られないこと、およびどの時点での損害かが不明なことから、対策による便益は計算不能である。

⁶ 議長の Presentation パワーポイントスライド 24 枚目

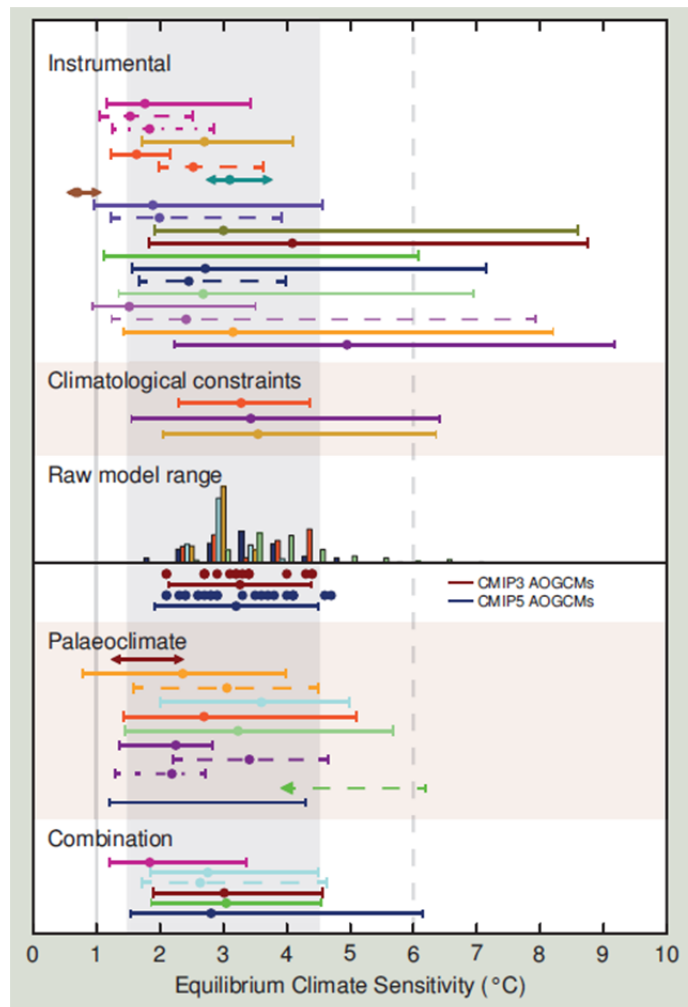
ある。

気候感度問題は温暖化の核心的問題であるので、本節では先ずこの問題に絞って検討を行う。

II-1 気候感度下方修正の理由

気候感度（厳密には均衡気候感度、Equilibrium Climate Sensitivity、以下 ECS）は大気中の CO₂ 濃度が倍増した際の気温上昇の関係を表す指標で、この不確実性は気候変動問題で最大のものの一つである。この計算手法はいくつかありその値はそれぞれ異なっている(図 3 参照)。この点 IPCC (2013)でも詳細な検討が行われている。

(図 3) 推計方式の差による気候感度の差 (IPCC/AR5/WG1.TS, TFE.6, Fig.1) p.83

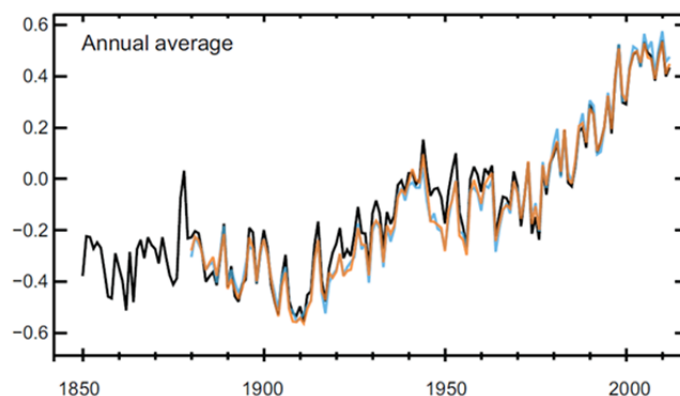


気候感度を推定する方式は詳細な気候モデルによるもの(AOGCM、Atmosphere–Ocean General Circulation Model による推定)、観測データに基づくエネルギーバランスモデルによるもの、古気候から推定する方式等があるが、このうち AOGCM が主流を占めている。この方式によれば AR5 でも ECS は 2~4.5°C と AR4 と変わらず、23 モデルによる平均値 (mean) は 3.2°C とされている (IPCC 2013, pp.83, 818)。WG1 が公表直前まで ECS を

AR4 と同じとしていたのはこうした背景があるものと思われる。

他方、1998 年以降 2012 年までの 15 年間は気温の右肩上がりが停滞し（図 4 参照、この現象は Hiatus と呼ばれている）⁷、これは AOGCM ではうまく説明ができない。こうした中で Hiatus も考慮した観測データに基づくエネルギーバランスモデルに注目が集まり、このモデルによる ECS は AOGCM に比べて低めとなる傾向がある（IPCC 2013, Rogelj et al. 2014）。

（図 4） 過去 160 年間の平均気温変化と Hiatus 基準年 1961-1990 年



出典：IPCC/AR5/WG1/Figure SPM.1(a)

ここで再び図 3 を参照願う。これは推定方式及びその方式を用いたモデルによる気候感度の差を表した図である。ここで Instrumental とは観察値に基づく ECS（以下観察結果方式）、Raw Model Range とは AOGCM の結果、Paleoclimate とは古気候に基づく ECS である。AR5 ではこの図（更にこの元となっている WG1/Figure 10.20）に基づき ECS を 1.5~4.5°C と判定した（網掛けの範囲）。なお、1°C 以下の確率は 0~5% (extreme unlikely)、6°C を超える確率を 0~10% (very unlikely) としている（図 3 の 1°C と 6°C の縦の実線と点線）⁸。最上段は AR4 以降の Instrumental 方式の 10 の研究結果（ただし一つの研究でデータの違いから複数の結果を得ているものもある）と AR4 で使われた 4 つの論文の 5 つの研究結果を含んでいる⁹。各研究結果の確率密度関数は WG1/Figure 10.20 を見る必要

⁷ IPCC/AR5/WG1/TS BoxTS.3 によれば 1998-2012 年間の気温上昇は 10 年間で 0.04°C で、これは 1951-2012 年の同 0.11% の約 1/3 とある。ただ、ごく最近 Hiatus は無いとする論文が Science に発表されている（Karl et al. 2015）。

⁸ 参考までに AR4 では 1.5°C より低い可能性は very unlikely としつつ、6°C 以上となる可能性は排除できないとしている（Analysis of climate and forcing evolution over previous centuries and model ensemble studies do not rule out climate sensitivity being as high as 6°C or more AR4/WG1/TD p.65.）。6°C を超える確率については Harvard の Martin Weisman 教授が有名な fat tail 論を展開しているが、この確率が AR5 で示された (very unlikely) ことは重要な点である。

⁹ この図は極めて見にくく、これを正確に理解するには WG1 第 10 章の Supplemental Material にまで遡らねばならないが、これは印刷された報告書には掲載されておらず、且つ電子ファイルで見ても極めて見にくいものである。IPCC としては読者 Friendly の観点からもう少し見やすい図を提供することが必要である。

があるが、詳細に亘るので参考資料として本稿末尾に **Instrumental** の部分のみを見やすくした拡大図を載せてある（参考図 1）。なお、図 3 の横線の幅は ECS の 5~95%の幅を示し、●印は **Median** を表す¹⁰。

この図から AOGCM では AR4、AR5 とともに参加の各モデルの気候感度の中央値が 2~4.5°C の間に集中しており（使用モデルは AR4 は **Coupled Model Inter-comparison Project Phase 3—CMIP3**、AR5 は **CMIP5**）、プロジェクト参加モデルの中間値（**mean**）がほぼ 3°Cであることが分かる（AR5 では上述の通り 3.2°Cであるが、AR4 では 3.3°Cである。後者については AR4/WG1/Box 10.2 p.799 参照）。しかし AR4 以降の観察結果方式のモデルでは 10 の論文の 13 の研究結果の中央値のうち 3°Cが一つ（Murphy et al. 2009）、これ以外は全てこれを下回る（末尾の参考図 1 参照）。こうした点を勘案して気候感度が AR4 の 2~4.5°Cから AR5 では 1.5~4.5°Cに下方修正されたことが明記されている（AR5/WG1 p.84）。

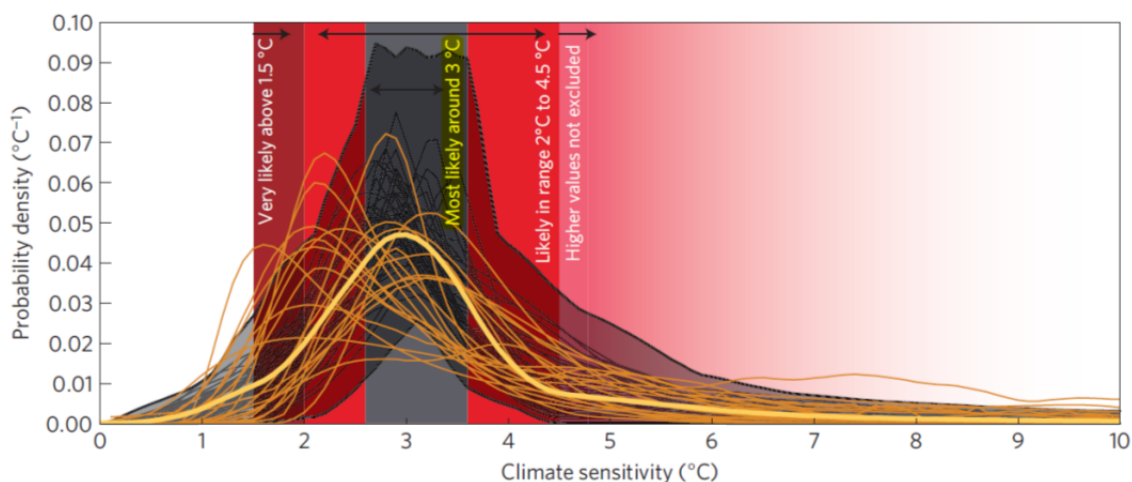
II-2 AR5 での各種計算と Best Estimate

既述の通り AR5 では **best estimate** について専門家の合意が得られず、示されなかった。この理由として ECS (1.5~4.5°C) の上方に近い値を示す AOGCM は観察された気象 (**climatology**) と整合性がある一方、ESC の下方の値を示す観察結果方式は観察される地表及び海洋の気温上昇と整合性があるという点（筆者註：つまりどちらが正しいとはいえない）、それにそもそも **best estimate** 及び **most likely value** は文献により様々な意味に使われていることが挙げられている（AR5/WG1 p.85）。

しかし本稿 4 頁の表 2 の計算には具体的な気候感度の数値が必要である。こうした状況で実際には気候感度としてどの数値が用いられたのか。AR5 はこの点 **silent** である。しかしヒントはある。表 2 は AR5/WG3/SPM/Table SPM.1 の一部を簡略化したものであるが、ここでは註 5 に濃度と気温上昇等の関係は簡易気候モデルである **MAGICC** (**Model for the Assessment of Greenhouse Gas Induced Climate Change**) を用いたと有り、註 7 では 2100 年の気温上昇は **MAGICC** の推定中央値 (**median**) を用いたとある。しからばこれは何°Cか。AR5/WG3/Ch.6 p.439 では濃度と気温の関係は **MAGICC** モデルを用いた Rogelj et al. (2012)及び Schaeffer et al. (2014)に依拠したとある。そこで前者の論文を見ると、気候感度の確率密度関数を用いて推計した結果 **Most likely value**（定義はないが一般的には **best estimate** と同義として使われている）は 3°Cで、AR4 と同じとなっている（Rogelj et al. 2012 p.2）。

¹⁰ IPCC では **best estimate** という言葉を使っているがこの言葉には定義が無く、専門家による価値判断で決まる。これに対し **Median** は統計学で言う中央値のことで、AR5 では本稿表 2 の計算にはこの数値を使っている。他方 AR4（本稿表 3）では **best estimate** を用いている。また **best estimate** と同じ意味で **most likely value** という言葉（これも統計学上の定義はない）も使われており、将来整理が必要である。

図 5 気候感度の確率密度関数の分布



出典 Rogelj et al. (2012)

図 5 は Rogelj et al. (2012) の気候感度の確率密度関数である。このうち黄色の太線がここでの代表的な気候感度確率分布を表している。この図からみると最頻値は 3°C である。

上記から AR5 の最も重要な表（本稿表 2）は気候感度 3°C を用いていたことが分かる。今世紀中に 1850-1900 年比で 66% 以上の確率で気温上昇が 2°C を超えないようにするためには 2050 年の世界排出量を 41-72% 削減する必要があるとの判断もこれに基づいている。なお、WG3 で気候感度として Rogelj の方法論に従って 3°C としたのが適正だったのかどうかは疑問のあるところである。もう一つの考え方として、ECS 推定方式別に best estimate を示し、その両方で所定の気温上昇を達成する濃度や排出量を示すという方法もあったのではないかと。この場合政策決定者は困惑するかもしれないが、むしろ気候変動問題の不確実性を浮き上がらせ、こうした状況での対応という側面に焦点が当たることになったのではないかと思う。

Ⅲ、気候感度と 2°C 目標

Ⅲ-1 Rogelj et al. 論文の検証

しかし AR5 では最終的に気候感度の幅（66%）は下方に修正されている。この理由は観測データに基づくエネルギーバランスモデルによる推定値が AOGCM のそれよりも低いためである。しかも前者の中央値の平均値は AOGCM のそれより明らかに低い（図 3 参照、末尾の参考図 1 は図 3 の Instrumental の一部を拡大したものであるが、目視による平均値は 2.4°C 程度である）。AR5 ではこの点を考慮しているので、常識的に考えれば best estimate も AR4 の 3°C より下がると推定すべきであろう（これまでの議論から中央値、最頻値、most likely value、best estimate が混在して使われていることが分かるが、以後は特段の断りがない限り AR4 との比較のために best estimate という言葉を用いる）。

こうした疑問を意識したかどうかは不明であるが、Rogelj et al. (2014) はエネルギーバ

ランスモデルに基づく推定方式の方が気候感度が低めに出ることを認めた上で、これが相当低い (much lower value) 或いは最低 (the lowest) の場合であっても、現在の排出を続ける (BAU) と仮定すると、工業化からの気温上昇が 2°C に達する時期が約 10 年遅れる、或いは 2°C 目標達成に必要な排出経路で 1.5°C を達成できる程度であるとしている。その上で、たとえ気候感度が低い場合でも対策の緊急性に変わりはない、むしろリスクを回避する (risk averse) 戦略としてはさらに挑戦的な削減策が求められると結論している。この論文では (AOGCM や観察データに基づくエネルギーバランスモデルも含む) 10 の異なる気候感度を対象に分析しており、このうち ECS の中央値の最低は 1.7°C、最高は 3.9°C である。従って気候感度が 1.7°C の場合でも上記結論は変わらないとしている。

ここで BAU の場合には気候感度が低くても 2°C 到達時点が 10 年遅れる点は理解できる。つまり現状では濃度が急激に上昇しているので、気候感度の相違に拘わらずすぐに 2°C を超えるからである。しかし気候感度が 1.7°C と非常に低い場合に Rogelj et al. (2014) の言うように 2°C の排出経路で 1.5°C が達成可能であれば¹¹、気候感度が例えば 3°C でなく 2.5°C なら気温上昇が 2°C より大きめの排出経路でも 2°C 以下に抑えることが可能となるのではないか。

III-2 INDC と 2°C 目標の可能性—RITE の試算

ここで本年 6 月末時点までに国連気候変動枠組条約事務局に提出された (或いは内容が既知となっている) 主要国のプレッジと 2°C 目標の関係を検討することで、気候感度の相違の影響を検討する。

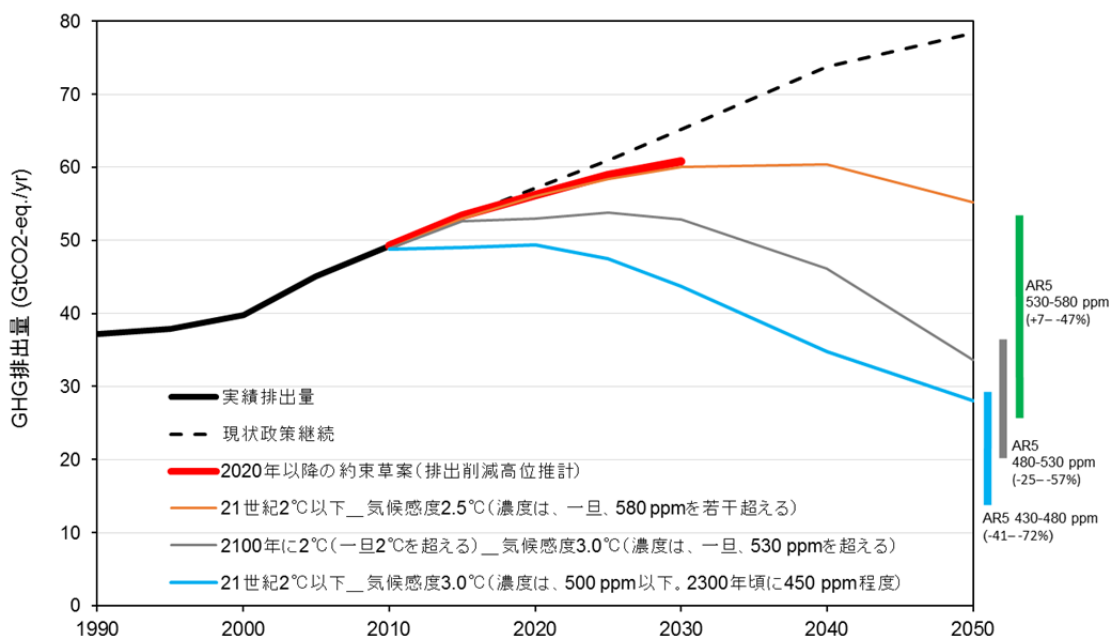
やや専門的になるが、簡易気候モデルである MAGICC の開発者はこの中身を自由に変えることが出来るが、我々外部のものにはこれが出来ない。外部に公開されている MAGICC モデルは誰でも自由にアクセス可能であるが、これは気候感度が予め 3°C に tuning されており、そこに色々な排出経路を input すると気温上昇が得られるものである。RITE エネルギーシステムモデル (DNE21+) と MAGICC モデルから気候感度 3°C の場合に 2100 年の気温上昇が工業化から 2°C 以内となる 2100 年までの排出パスを得ることが出来るが、その場合の 2030 年の世界の排出総量は 529 億 tCO₂e (ただし濃度は一時的に 530ppmCO₂e をオーバーシュートし、気温上昇も一時的に 2°C を超える) に抑えることが必要である (図 6 の灰色の線、なお、21 世紀を通して 2°C 以内、且つ濃度も 500ppm を一時的に超えないケースの場合は 437 億 tCO₂e と更に厳しい。図 6 の青色の線)。しかし 6 月末現在 UNFCCC に提出されたプレッジ (INDCs) を勘案した世界の 2030 年の排出量の RITE の推計は約 600 億トンと見込まれ、これでは 2°C 目標達成はほぼ絶望である (排出量見込みについては本稿末尾の参考表 1 参照)。この点は RITE モデルによる分析に限

¹¹ ここで Rogelj et al. (2014) が触れていないのは、同じ 2°C 目標を達成することを前提として ECS が 3°C の場合と 1.7°C の場合の排出経路にどの程度差があるかという点である。これが分かれば気候感度の差が如何に影響が大きい目瞭然となるのではないかと思う。

らずあちこちで言われており、実際本年 6 月に発表された国際エネルギー機関 (IEA) の特別報告書 (World Energy Outlook 2015 Special Report on Energy and Climate Change) では、2°Cを 50%の確率で達成可能な排出量を 2040 年には超えてしまう (INDCs はこれを 8 ヶ月遅らせるだけの効果しかない) と予測している。なお、RITE の試算はアメリカのように幅がある場合は厳しい方を採用し、また、アメリカの場合 2025 年目標とされているが 2050 年に 8 割削減とのアメリカの目標があるのでこの間は 80%削減に向けて直線的に削減が行われると仮定して 2030 年の排出を求めた。また、日本は INDC 未提出であるが政府原案である 2013 年比 26%削減とし、中国は CO₂ の GDP 原単位改善のプレッジを排出量に引き直して 2030 年の排出量を 167 億 tCO₂e とした。しかしこれは BAU に限りなく近い数値である。

仮に best estimate が下限 (66%の範囲) の 1.5°C、或いは上限の 4.5°Cだと 2°C目標達成のシナリオがどのように変わるのか。既述の通り MAGICC モデルでは気候感度を変えることは可能だが本来であればそれに伴い各種パラメーターも調整する必要がある。しかしこれは外部者には出来ない。従って気候感度として 1.5~4.5°Cの両端の数字を入れてもその結果は信頼性の低いものになってしまう。そこで比較的歪みが少ないと思われる 2.5°Cを用いて 2°C目標に整合的な排出パスを求め、気候感度 3°Cで 2°C目標達成が可能となるシナリオと比較したのが図 6 である (気候感度 2.5°Cの排出経路はオレンジ色)。

(図 6) INDC と 2°C目標 気候感度の差による相違 (RITE 作成)



上記のうち黒の太線は実績排出量、黒の点線は特段の対策を実施しない場合の排出量見込み、赤の太線は INDC を考慮した 2030 年までの世界の排出量、オレンジは 21 世紀を通して 2°C以下に止まるシナリオ(計算上は一時的に 2°Cを 0.04°C程度超える)、但し気候感度 2.5°C、濃度はオーバーシュート有り、灰色は気候感度 3°Cの場合の 2100 年に 2°C以下に止まるシナリオ、濃度・気温ともオーバーシュート有り、青色は気候感度 3°Cで 21 世紀を通して 2°C以下に止まるシナリオ。右端の縦の線はそれぞれの濃度 (例えば

青の場合には 430-480ppm) に対応する IPCC の排出シナリオの幅を表し、青は 21 世紀を通して 2°C 以下となる確率が 66%以上のシナリオの範囲、灰色はその確率が 33-66%のシナリオの範囲、緑は 50%以下のシナリオの範囲を示す(本稿表 2 参照)。IPCC のシナリオは全て気候感度 3°Cを前提としたもの。従ってグラフの中の RITE のオレンジの線(気候感度 2.5°C)と欄外の IPCC の緑の幅は直接比較できない。

上図から分かるとおり各国のプレッジを積み上げたもの(図 6 の太い赤線)は、もし気候感度が 2.5°Cであれば 21 世紀を通して 2°C以下となる排出経路(オレンジの線)と重なり、何とか 2°C目標と整合性を保つことが可能である。Rogelj et al (2014)と異なり僅か 0.5°Cの気候感度の差の政策に与える影響は極めて大きいものである。参考までに気候感度の差による 2100 年までの排出経路の差(RITE シナリオによる)を末尾に参考図 2 として示す。

IV、気候感度修正と国際交渉への示唆

本年 6 月 7~8 日にドイツで開催された G7 サミット宣言では世界共通の目標として気温上昇 2°C以内を挙げた上で、2050 年の世界全体の排出量を IPCC/AR5 の勧告の幅である 2010 年比 40~70%削減のうち大きい方(70%)に近い水準とすることを全ての国と共有のビジョンとしたいとの一文がある。これはまさに本稿表 2 の 21 世紀中に 2°Cを超えない確率が 66%以上となる排出量のうち最も厳しい削減を目指すことを意味している。AR4 ではもし 2°C目標達成を目指すのであれば 2000 年比で 2050 年の世界排出量を 50-85%削減とあったが、当時のサミットではこのうち低い方の 50%削減(2000 年の排出量が 400 億トンなので 2050 年排出量は 200 億トン程度)を目指すとしていた。本年のサミットでの 2010 年比 7 割近い削減(この場合 2050 年排出量 147 億トンに近い水準)は 2000 年比では 63%削減に相当し、削減率を引き上げたことになる。いずれにしても今後は 2010 年比 40-70%削減を中心に国際交渉が進むものと思われる。しかし低い方の 40%減は 2000 年比 28%削減に相当し、仮に 2°C目標達成の確率を 33-66%に落としても 2010 年比 25%の削減となり、これを 2000 年比にすると 8%の削減(2050 年排出量 368 億トン)が必要である。現時点でのプレッジは 2050 年の排出量が 553 億トンとなる軌道上にありこの点からも 2°C目標達成はきわめて困難と言わざるを得ない。つまり G7 の政治宣言はあるものの、今回提出された INDCs を見る限り 2°C目標達成は(現在知られていないような技術が安価に活用される場合以外は)ほぼ絶望的である。なお、本稿では各国のプレッジが完全に履行されることを前提としている。この点は日米については疑念のあるところである。なお、中国は今後の成長率の低下を考慮すると先述のようにほぼ BAU に近いので実現は困難ではないものと考えているが、ここではこれ以上深入りをしない。

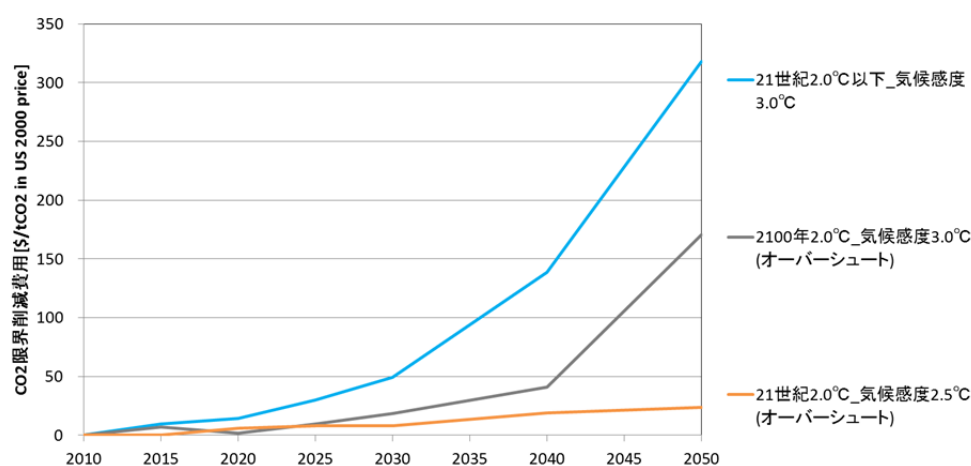
G7 に先立つ本年 2 月、EU は 2030 年に EU の排出量を 1990 年比 40%削減する内容を含む The Paris Protocol – A blueprint for tackling global climate change beyond 2020 とする文書(EU 2015a)を公表し、この中でパリ会議では 2°C目標達成のために新たな議定書に合意し、その内容を法的拘束力を持つものとする提案を行った。更にこの文書付属の文書(EU 2015b)では 2050 年の世界の排出量は 2010 年比で少なくとも 60%削減が必要

とし¹²、この実現に向けての 2030 年の主要国の排出削減割合を、例えばアメリカは 2005 年比 43%、中国は GDP に対する CO₂ 原単位の 2005 年比 70%改善、日本は（グラフからの目測であるが）仮に 2013 年を基準年ととれば 29%程度、2005 年比では 33%程度削減などとされている。もとよりこれは EU が独自に出した数値であり、単なるアイデアに過ぎないが、問題はこの背景にある思想である。つまり 2°C 目標達成を絶対視した上での各国への目標配分の考え方であり、しかもこれに法的拘束力を持たせようとの案である。現時点での INDCs から考えて非現実的な案であると同時に、仮にこれを強行しようとするればアメリカを筆頭に反対の声があがり、交渉決裂は避けられない。つまり 2°C 目標にこだわる限り交渉が行き詰まるのは時間の問題である。

しかしこれまでの議論から、G7 の宣言及び EU の提案は気候感度 3°C を前提としたものであることが明らかである。仮に気候感度が 2.5°C の場合には RITE（および MAGICC）モデルで計算したところでは 2°C 目標達成の可能性が出てくる。

この点はコストの面からもいえる。気候感度が 2.5°C の場合には図 7 の通り 2°C 目標達成の限界削減費用が大幅に下がり（2050 年では気候感度 3°C の場合の二つのシナリオが 318 ドル、171 ドルであるのに対して、2.5°C の場合は 24 ドル）、目標達成の現実性が増す。

図 7 気候感度の差による 2°C 目標達成の限界削減費用 \$/t-CO₂ (RITE)



V、結論

気候感度の下方修正に伴い best estimate も AR4 より下がると考えるのが合理的な状況にあつて、気候感度の 0.5°C の違いはこれほど大きい。また、INDCs では 2°C 目標に到底届かないことはほぼ関係者が共有している知見である。このまま（気候感度 3°C のまま）で 2°C 目標に固執することは交渉を決裂に導くか或いは 2°C を実現可能性とは離れた目標（aspirational target）に変身させ、結果として実効性ある取り組みを阻害する恐れがあ

¹² 2010 年比 60%削減は 2000 年比では 50%削減に相当する。この段階では単に従来の 2000 年比 50% を 2010 年比に言い換えただけであるが、6 月の G7 で 40-70%削減のうち厳しい方（upper end）というのはこれを上回るものである。

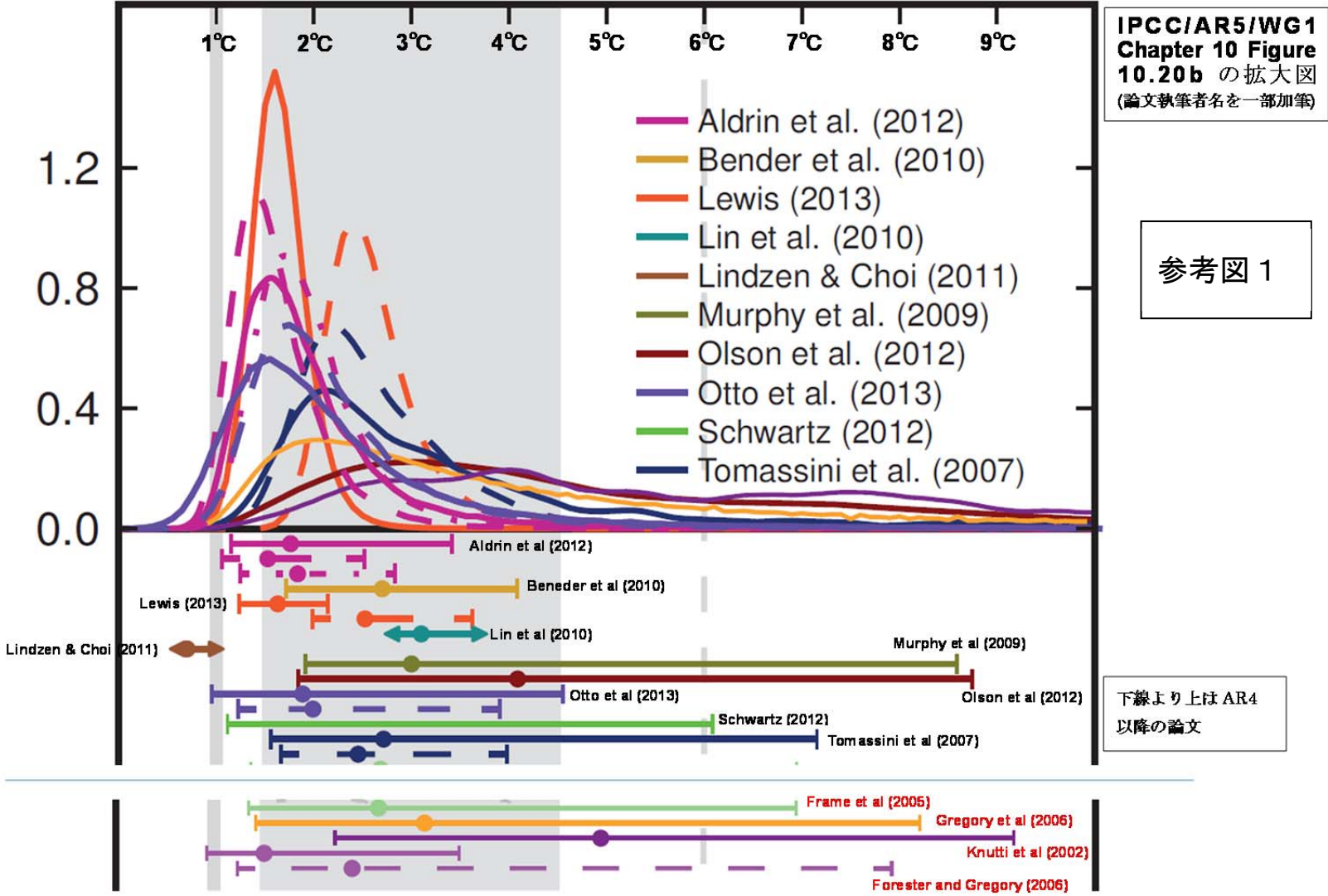
る。こうした中で筆者は

- 1) 現在気候感度には大きな不確実性がある。我々の計算ではこれが 2.5°Cだと、INDCsでも 2°Cと整合性があり、限界削減費用も大幅に下落して 2°C目標達成の現実味が増す。従って国際社会がこのことを認識し、不確実性の幅を縮小する努力を早急に行うこと、換言すれば気候感度の見直しを早急に行うこと
- 2) 併せて、我が国はじめ世界の政治指導者に温暖化問題には大きな不確実性があり、その上限と下限では対策コストがまるで異なること、こうした中での対策の実現には一つの気候感度（今回は 3°C）を基にしたシミュレーションで長期の目標を定めるのではなく、仮に AOGCM とエネルギーバランスモデルの専門家が best estimate に関して合意できないようであればこの両方について best estimate を提示の上、気温上昇抑制目標ごとに二つの排出パスを示すと言った努力をする（AR5 のように見えないところで単一の best estimate を用いることで世界のリーダーをミスリードしない）こと
- 3) この点も含んで不確実性を考慮したリスクマネジメント戦略の立案、具体的には長期の戦略を念頭に置きつつ、その知見の進展に応じて戦略を柔軟に変更することを提案する。

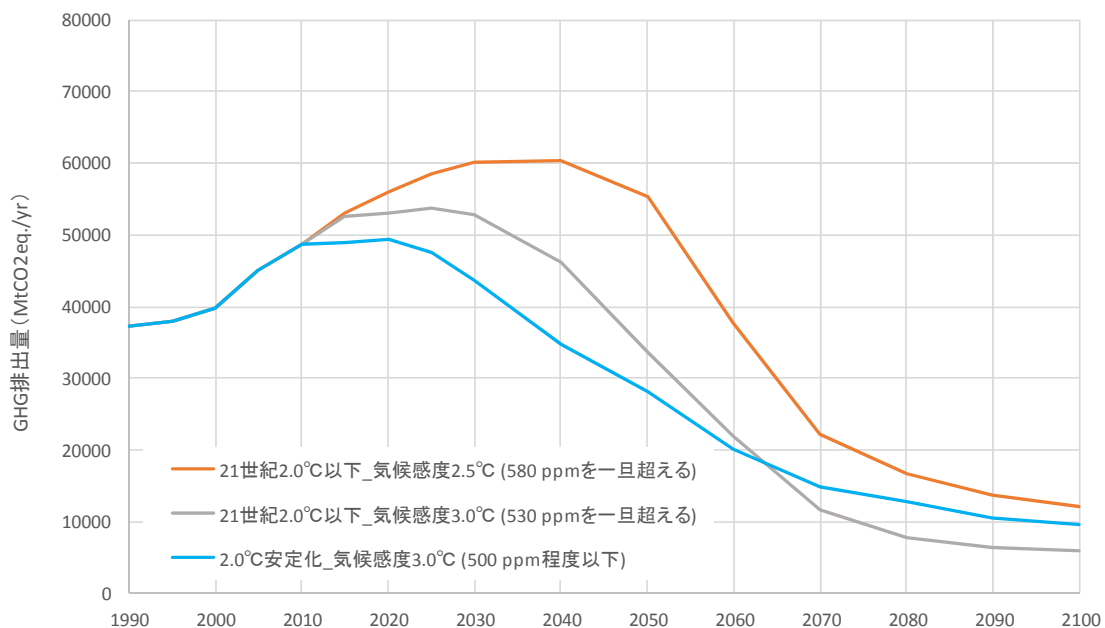
参考文献

- EU (2015a), “ENERGY UNION PACKAGE, COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL -- The Paris Protocol – A blueprint for tackling global climate change beyond 2020”, COM(2015) 81 final, February 25, 2015
- EU (2015b), “COMMISSION STAFF WORKING DOCUMENT Accompanying the document COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL -- The Paris Protocol - a blueprint for tackling global climate change beyond 2020”, SWD(2015) 17 final, February 25, 2015
- Karl, T.R et al. (2015), “Possible artifacts of data biases in the recent global surface warming hiatus”, Karl, T.R., Arguez, Anthony, Huang, B., Lawrimore, J.H.,McMahon, J.R., Menne, M.J., Peterson, T.C., Vose, R. and Zhang, H. M., Science VOL 348 ISSUE 6242, 26, June 2015
- IPCC (2013), “Climate Change 2013: The Physical Science Basis”, ed. Stocker, T. et al., Cambridge University Press
- IPCC (2014a), “Climate Change 2014: Impacts, adaptation, vulnerability”, ed. Field,

- C.B. et al., Cambridge University Press
- IPCC (2014b), “Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change”, ed. Edenhofer, O. et al., Cambridge University Press
- IPCC (2014c), “Climate Change 2014: Synthesis Report”, ed. Pachauri, R.K. et al., Cambridge University Press
- Rogelj et al. (2014), “Implications of potentially lower climate sensitivity on climate projections and policy”, Rogelj J., Meinshausen M., Sedláček J. and Knutti, R., Environmental Research Letters
<http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/9/3/031003>
- Rogelj et al. (2012), “Global warming under old and new scenarios using IPCC climate sensitivity range estimates”, Rogelj J., M. Meinshausen, and R. Knutti, Nature Climate Change 2, 248 – 253.
- Schaeffer et al. (2015), “Mid- and long-term climate projections for fragmented and delayed-action scenarios” Schaeffer M., L. Gohar, E. Kriegler, J. Lowe, K. Riahi, and D. Van Vuuren, Technological Forecasting and Social Change 90 25-268
- Schneider, S.H. (2009), “Science as a contact sport, inside the battle to save earth’s climate”, National Geographic, Washington D.C.
- Smith et al. (2009) “Assessing dangerous climate change through an update of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) “reasons for concern”, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America



参考図2 気候感度の相違と排出経路 2100年までの長期シナリオ (RITE)



参考表1 シナリオごとの排出量比較 単位億トン CO₂e RITE モデルによる計算

	2020	2030	2050	2100
BAU	572	652	784	
INDCを考慮した排出量	559	599	—	—
21世紀 2°C以下, ECS 2.5°C	561	601	553	121
2100年 2°C以下, ECS 3°C	530	529	336	58
21世紀 2°C以下, ECS 3°C	494	437	280	96