

2°C目標と統合的な長期の排出削減について —IPCCシナリオデータベースを用いた検討—

Analysis of long-term emissions reduction consistent with the 2°C goal
— Investigation with the scenario database of IPCC AR5—

キーワード：2°C目標、累積CO₂排出量、気候感度、排出シナリオ、簡易気候モデル

筒 井 純 一

長期的視野で地球温暖化対策を考える際に、世界平均の温度上昇と累積CO₂排出量の近似的な比例関係が前提とされるようになった。本稿では、この比例関係についてIPCC第5次評価報告書の知見を踏まえた解説をしつつ、同報告書のシナリオデータベース(AR5DB)に基づいて、パリ協定で定められた2°C未満という温度目標と整合する長期的な排出削減水準を検討した。AR5DBに含まれる多数のシナリオから、2°C未満の確率と温度上昇の予測幅における中央値との関係が見出される。確率が「66%程度」のシナリオでは、温度上昇の中央値が1.8°C程度であった。温度上昇への寄与はCO₂要因と非CO₂要因に分解でき、累積CO₂排出量は400 GtCO₂当たり、非CO₂放射強制力は0.3 W/m²当たり、ともに中央値で0.17~0.18°C程度の寄与であった。これらの関係性を踏まえると、温度目標の達成に統合的なCO₂の長期削減量は、累積CO₂排出量が目安となるものの、確率と非CO₂放射強制力の前提に依存すると言える。

- | | |
|---|--|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. はじめに 2. 温度上昇と累積CO₂排出量の比例関係 <ol style="list-style-type: none"> 2.1 比例関係の仕組みと不確実性 2.2 CO₂バジレットの評価 3. IPCC AR5 シナリオデータベースにおける気候関連データの分析 <ol style="list-style-type: none"> 3.1 累積CO₂排出量と温度上昇の関係 3.2 2°C目標の達成確率の違いが排出量におよぼす影響 3.3 各確率区分における温度上昇の分布 4. CO₂要因と非CO₂要因の分解 | <ol style="list-style-type: none"> 5. UNFCCC事務局と国際エネルギー機関(IEA)によるシナリオとの比較 <ol style="list-style-type: none"> 5.1 UNFCCCレポートの費用最小2°Cシナリオとの比較 5.2 IEAによる450シナリオとの比較 5.3 両シナリオの比較-特にオーバーシュートについて 6. 結論 <ol style="list-style-type: none"> 6.1 温度目標と統合的な長期削減 6.2 政策への示唆 <p>付録 温度上昇の要因分解について</p> |
|---|--|

1. はじめに

地球温暖化対策は世紀単位の超長期的課題であり、近年、長期的視野に立って、対策を考えることが求められるようになってきた。例えば、パリ協定には、世界平均の温度目標とその達成に向けた長期の排出削減策の目標が、それぞれ次のように記載されている。

- ・温度目標：産業革命前(18世紀中頃)を基準とする世界平均の温度上昇を2°Cより十分低

く抑え(well below 2°C)、1.5°C未満に抑える努力を追及する¹(2条1(a))

- ・排出削減目標：世界の温室効果ガス(greenhouse gas: GHG)排出量を出来る限り早期に減少に転じ、今世紀後半にGHGの人為的な排出と吸収のバランスを達成すべく、最善の科学にしたがって急速に削減する(4条1)

これらの目標を踏まえ、各国はパリ協定の下で、今世紀中頃(mid-century)に向けた長期低排出

¹ 本稿では、特に断りのない限り、温度に関する数値は、産業

革命前比の世界平均気温の上昇量を指すものとする。

発展戦略を、2020年までに提出するよう求められている。

地球温暖化の科学基盤にも進展があり、長期的視野で対策を考える際に、最近では温度上昇と累積CO₂排出量の近似的な比例関係が前提とされるようになった。両者が比例するという事は、温度上昇を止めるためには、累積CO₂排出量の増加を止める、すなわち正味ゼロ排出にする必要があることを意味する。この知見はシンプルで分かりやすく、気候政策に重要な示唆を与えるが、それだけに、その科学的根拠を正しく認識しておくことが求められる。

本稿の目的は、この比例関係の仕組みを解説しつつ、パリ協定で定められた2°C未満という温度目標と整合する長期的な排出削減水準を論じることである。

その際に主に依拠するのは、気候変動に関する政府間パネル（Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC）の第5次評価報告書（Fifth Assessment Report: AR5）である。IPCCは3つの作業部会からなり、温度上昇と累積CO₂排出量の比例関係については、科学基盤を扱う第1作業部会（Working Group I: WG1）と排出削減を扱う第3作業部会（Working Group III: WG3）が関係する。AR5は2013年から順次公表され、WG1については2013年に、WG3については2014年に報告書が取りまとめられた。

こうした科学的知見は往々にして非常に複雑であり、本稿の記述もかなり専門的なものとなる。そこで、結論部に相当する6章において、「2°C未満という温度目標と整合する長期的な排出削減水準」という主題について、本稿で論じたことの総括を本文中の該当箇所を参照しながら提示した。したがって、最初から6章に進み、必要に応じて本論部分である2章～5章の

該当箇所に遡るといった読み方も可能である。

以下では、まず2章において、AR5で示された温度上昇と累積CO₂排出量の比例関係の仕組みを解説し、この知見が得られたことを契機として頻繁に用いられるようになった、CO₂バジェットという概念について整理する。この部分は主として、IPCCのWG1の知見に關係する。

続いて3章では、WG3に関連する知見として、AR5時点の排出削減シナリオを取り上げ、温度などの気候データとの関係を分析する。AR5時点のシナリオが集約されたAR5シナリオデータベース（Krey et al., 2014）（以下、AR5DBと略記）を分析対象として、シナリオにおける温度上昇と累積CO₂排出量の比例関係を確認しつつ、2°Cの達成確率とシナリオの特徴（特に化石燃料起源排出量と土地利用起源排出量の内訳およびCO₂以外の温室効果ガス等の影響）の関係を整理する²。

これらを踏まえて、4章では温度上昇への寄与をCO₂要因と非CO₂要因に分解し、それぞれを指標化した数値から、任意の排出シナリオに対して温度上昇を定量化できることを示す。この要因分解に着目するのは、温度上昇との比例関係や、パリ協定の温度目標との整合性を論じる際に、非CO₂要因を切り分けることで見通しが良くなるためである。

5章では、科学的知見が国際機関でどのように活用されているのかを見るために、気候変動枠組条約（United Nations Framework Convention on Climate Change: UNFCCC）事務局および国際エネルギー機関（International Energy Agency: IEA）による2°Cシナリオ分析を取り上げる。UNFCCC事務局は、各国がパリ協定の下で提出した目標（nationally determined contribution）の積み上げ効果を、2°Cや1.5°Cといった協定の温

² 本稿執筆時点（2018年2月）では、IPCC第6次評価報告書（AR6）に向けた新しいシナリオや気候モデル研究（Eyring et al., 2015; O'Neill et al., 2016; Riahi et al., 2017）が進む一方で、2018年9月に発表されるIPCCによる1.5°Cの地球温暖化

に関する特別報告書に向けた研究は、AR5時点の気候モデルやシナリオ情報に基づいている。そこで、本稿もAR5時点のシナリオを用いる。

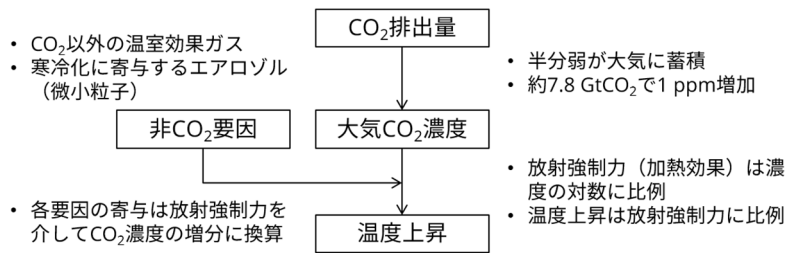


図1 CO₂排出とCO₂以外の要因による温度上昇の考え方

度目標と比較した (UNFCCC, 2016)。IEAは毎年公表している見通し (World Energy Outlook) で提示されたシナリオの中から、パリ協定後に、2°C目標に相当するシナリオを再定義した。ここでは3章と4章における分析を用いながら、両機関のシナリオの特徴を整理する。

最後に6章において、2章から5章までの分析を踏まえて、温度目標と長期削減の関係を整理した上で、長期的な温暖化対策を検討する際に考慮すべき点を論じる。

2. 温度上昇と累積CO₂排出量の比例関係

人間活動に伴う地球温暖化は、大気、海洋、陸域生態系、雪氷域などで構成される地球システム全体におよぶ。関連する個々のプロセスは非常に複雑であるが、人間活動がシステム全体におよぼす作用とそれによる応答は、図1のように集約される。海洋も含めた地球システムの温度上昇は、放射強制力と呼ばれる加熱作用によって生じる³。以下では複雑な科学基盤をこの図1のように集約された形で捉えた上で、AR5で示された温度上昇と累積CO₂排出量の比例関係の

背後にある仕組みを考察する⁴。

2.1 比例関係の仕組みと不確実性

温度上昇と累積CO₂排出量の比例関係は、IPCC WG1の分野で、多くの複雑な気候モデル計算から確認されている (Collins et al., 2013)。この比例関係は比較的新しい知見であり、2007年の第4次評価報告書 (AR4) 以降の学術論文で言及され始め (Allen et al., 2009; Matthews et al., 2009; Meinshausen et al., 2009)、AR5で明記されるに到った。

温度上昇には様々な複雑なプロセスが関与しており、比例関係は複数の非線形要因が相殺された結果、近似的に成立すると考えられている (Matthews et al., 2009)。この仕組みは、累積CO₂排出量との関係を模式的に示した図2において、「①排出が続く状態」と「②排出が止まった状態」に分けて考えることができる。

「①排出が続く状態」では、上に凸の曲線 (図2a) と下に凸の曲線 (図2b) の相殺関係が存在する。前者はCO₂の放射強制力が濃度の対数に比例すること、後者は排出とともに温暖化が進んで、大気中に留まるCO₂の割合 (airborne

³ この放射強制力は、大気中のCO₂濃度の増加が主因であり、その他に、CO₂以外の温室効果ガスや、寒冷化の効果をもつ大気中の微小粒子 (エアロゾルと呼ばれる) の寄与もある。CO₂濃度や非CO₂要因の変化は、CO₂やその他の原因物質の排出で生じ、CO₂排出を伴う人間活動は、化石燃料の燃焼、セメント製造などの工業プロセスおよび土地利用の改変に大別される。

⁴ 複雑な気候モデルは、図1の中でCO₂等の濃度から温度上昇を求めるところの開発が先行し、排出量から濃度を求め

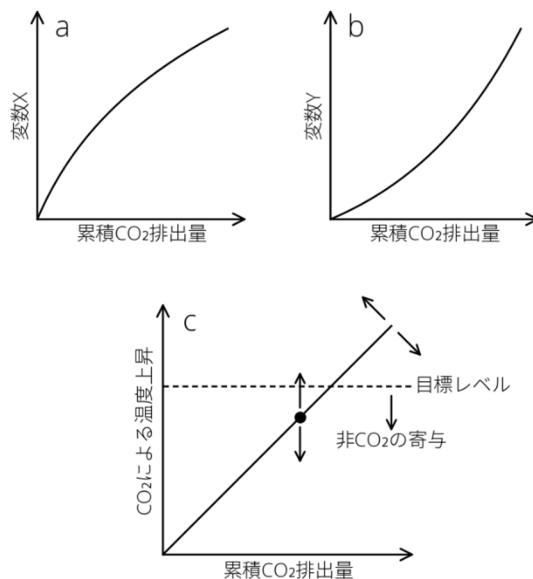
る部分は比較的新しい。全体を統一的に扱うモデルは地球システムモデルと呼ばれ、AR4の頃から徐々に利用され始め、AR5で本格的な評価対象になった。このため、温度上昇の定量的な評価において、従来は大気中のCO₂濃度 (もしくはGHG濃度) との関係が注目されることであった。AR5以降は温度上昇が直接CO₂排出量と結びつけられるようになったわけだが、これには地球システムモデルの利用の本格化が背景にある。

fraction, 以下AF)が増加することが対応する。両者のかけ算となる温度上昇は、結果的に直線に近くなる(図2c)。累積CO₂排出量の増加とともにAFが増加する要因には、海水のCO₂溶解度の低下、海洋の成層化(対流が弱まる)、土壌有機物の分解加速などがあり、いずれも温度上昇に起因し、AFと温度は相乗的に増加する⁵。

「②排出が止まった状態」は、図2cの直線上の1点で横軸の値が固定された状態に対応する。そこでは縦軸に示す温度上昇を助長する要因と、逆に抑制する要因がはたらき、この場合も結果的にはほぼ同じ状態に留まる。両要因とも海洋のはたらきが関係し、助長要因は海洋の熱慣性、抑制要因は長期間におよぶ海洋のCO₂吸収による。海洋の熱容量や潜在的なCO₂吸収量は非常に大きく、また海洋深部の循環は非常にゆっくりしたものであるため、海洋の作用は数千年規模で続く。

図2cの直線の傾きを表す比例定数には大きな不確実性が残されている。関係する要因は、AFを決める「自然のCO₂吸収」と、放射強制力に対する温度上昇の大きさを表す「気候感度」に大別される。

「気候感度」はCO₂濃度倍増による約3.7 W/m²の放射強制力に対する温度上昇と定義され、濃度2倍で平衡に達する状態と、年率1%で増加して2倍に達する70年目の状態が指標に使われる。それぞれは平衡気候感度(equilibrium



出典: Matthews et al. (2009)を基に作成

図2 温度上昇と累積CO₂排出量の比例関係の概念

climate sensitivity: ECS) および過渡気候応答(transient climate response: TCR) と呼ばれる。

ECSは従来から約3°Cと認識され、AR5では1.5~4.5°Cの可能性が高いと評価された。TCRには海洋のはたらきによる温度上昇の遅れが反映され、ECSの6割程度が目安となる。ただし海洋の熱吸収の度合いに定まった評価はなく、ECSに対するTCRの比率は、AR5時点の複雑な気候モデルで0.5~0.7の幅がある(Tsutsui, 2017)。AR5ではTCRの値は1~2.5°Cの可能性が高いと評価され、多数の複雑な気候モデルもこの幅に収まる^{6,7}。

⁵ 温度上昇と累積CO₂排出量の比例関係は、あくまでも近似的なもので、排出が増え続けると比例関係からのずれが大きくなる。WG1AR5では、近似的な比例関係が成立するのは、産業革命前からの累積CO₂排出量が約7,300 GtCO₂(2,000 GtC)に達するまでと評価している。WG1AR5で示された気候モデル計算の傾向では、比例関係からのずれが上に凸の形状、すなわち、AF増加の効果と比べて放射強制力が対数的にしか増えない効果が上回ることが伺える。比例関係の成立条件は、2011年以降では約5,300 GtCO₂までとなり、AR5DBの大半のシナリオはこの範囲に含まれる。したがって、少なくとも2°C目標のような低排出のシナリオについては、比例関係を前提とする考え方は妥当である。

⁶ 気候感度については、これまでに多くの研究が蓄積されている(Knutti et al., 2017)。ただし、研究は着実に進んでいる

ものの、気候感度の不確実幅は過去30年でほとんど変わっていない。

⁷ 温度上昇と累積CO₂排出量の比例関係が成立する度合いは、気候感度の大きさとはあまり関係しない。気候感度が大きいと、同じ排出量に対して温度上昇がより大きくなる。この場合AFが増加して図2bの非線形性が増すが、濃度増加が対数的に効くために図2aの非線形性も増す。両者は完全に相殺されるわけではないが、直線的な関係は維持される形となる。このように、温度上昇と累積CO₂排出量の関係は、定量的な不確実性があるが、比例関係という点では頑健性がある。

2.2 CO₂バジェットの評価

累積CO₂排出量は、最近では、温度目標と関係づける文脈で、バジェット (budget) と言及されるようになった (Knutti and Rogelj, 2015など)。これは財務的な意味ではなく、従来から地球物理学の分野でエネルギーや水の収支を意味する用語に使われてきた、一般的な「ストック」の概念に通じる。すなわち、大気、海洋、陸域生態系といった地球システムの構成要素に、様々な形態で炭素がストックされており、要素間の炭素の出入りを考慮した炭素ストックの増減をバジェットと言い表すということである。

AR5では、累積炭素排出量に対する過渡的気候応答 (transient climate response to cumulative carbon emissions: TCRE) と呼ぶ指標を3,670 GtCO₂ (1,000 GtC⁸) 当たりの温度上昇と定義し、この値の可能性が高い (>66%) 範囲を0.8~2.5°Cと評価した⁹。TCREを用いると、所定の温度目標に整合的な累積CO₂排出量の上限 (以下CO₂バジェット) が直ちに算定される。例えば、TCREの中央値を (0.8~2.5°Cの中間の) 1.65°Cと見れば、確率>50%で1.65°C未満に抑える場合のCO₂バジェットは3,670 GtCO₂となる¹⁰。

TCREに基づくCO₂バジェットは、CO₂のみに起因する温度上昇が対象であり、非CO₂要因を

含む現実的な条件には適用できない。これは、CO₂とその他のGHGでは大気中の寿命が異なるため、温度上昇とGHG排出量では比例関係が成立しないことによる。メタンや一酸化二窒素などの排出量をCO₂相当量に換算する地球温暖化係数は、特定の条件¹¹でCO₂と等価となるよう調整された変換係数に過ぎない。

非CO₂要因は時間とともに変化し¹²、その変化に対する温度の応答も一律ではないが、非CO₂要因が加わると、図2cの直線状の温度上昇の分布が全体的に底上げされる形となる。このため、2°Cなどの目標とする温度レベルに対し、CO₂のみによる温度上昇の目標は、より低く抑えられる。

この「非CO₂要因による目減り」を考慮したCO₂バジェットは、AR5の統合報告書の中で、WG1とWG3のそれぞれの手法で評価された結果が一覧されている (IPCC, 2014 Table 2.2)¹³。評価結果の中で、例えば確率>66%で2°C未満の場合は、1870年以降¹⁴のCO₂バジェットが、WG1の手法では2,900 GtCO₂、WG3の手法では2,550~3,150 GtCO₂とされる。WG3の評価が幅で示されるのは、非CO₂の放射強制力として多様なシナリオが考慮されることによる。これに対しWG1の手法では、高めの放射強制力となる特定のシナリオ¹⁵が使われている (Collins et al.,

⁸ GtC は炭素のみで10億トンを表す単位で、CO₂全体ではその3.67倍に換算される。

⁹ TCREには気候感度と「自然のCO₂吸収」の不確実性が反映される。2種類の気候感度のうち、TCREに関係するのはTCRの方である。

¹⁰ TCREの確率分布として、0.8~2.5°Cの範囲が±1倍の標準偏差となる正規分布を仮定すると、3,670 GtCO₂は確率>66%で2°C未満に抑える場合のCO₂バジェットであることを確認できる(筒井, 2017)。この正規分布を仮定する方法はWGIARSで示されたもので、任意の確率と温度目標の組み合わせに適用できる。

¹¹ 排出後100年間の平均的な放射強制力に関して等しくなる条件。

¹² エアロゾルも含めた非CO₂要因を合計した放射強制力は、不確実幅が大きいものの、現状で0.3 W/m²程度と推定され

る。今世紀前半は、非CO₂のGHGの増加および寒冷化に寄与するエアロゾルの減少により、増加傾向となる。

¹³ WG1では、代表的な排出シナリオに対する複数の地球システムモデルによる計算、WG3では、複数の統合評価モデルと前提条件の組み合わせで作成された多数の排出シナリオに、簡易気候モデル (MAGICC) の確率論的評価を適用した結果、すなわちAR5DBに基づく。

¹⁴ 産業革命前 (18世紀半ば) ではなく19世紀後半が起点となるのは、WG1分野の複雑な気候モデル計算では、通常19世紀後半を起点に過去の気候再現とそれに続く将来の気候予測が計算されることによる。

¹⁵ 代表濃度パス (Representative Concentration Pathway: RCP) (Moss et al., 2010)と呼ばれる気候モデル計算に使われた4種類のシナリオのうち、最も温暖化が進むRCP8.5が使われた。

2013)。評価結果には2011年以降のCO₂バジェットも併記されており、確率>66%で2°C未満の場合は、WG1の手法では1,000 GtCO₂、WG3の手法では750~1,400 GtCO₂とされる。このうち1,000 GtCO₂の方は、1兆トンのCO₂として、政府の文書でも言及されるようになった¹⁶。

CO₂バジェットは、概念自体がまだ新しく、様々な方法論が提案されている研究段階にある。WG1とWG3の手法の違いについては、関連するCO₂バジェットの定義の違いも含めて、AR5の情報を補足する論文 (Rogelj et al., 2016) が発表されている¹⁷。手法にはそれぞれ一長一短があり、評価手法によって異なるバジェットが評価される。

3. IPCC AR5シナリオデータベースにおける気候関連データの分析

IPCC WG3の報告書では、2100年までの排出削減や関連技術の見通しが、統合評価モデルで計算された多数のシナリオを分析する形で示されている。統合評価モデルとは、排出量に関わるエネルギーと経済の相互依存を定式化したもので、モデルで出力される各種の社会経済変数の時間展開がシナリオとなる¹⁸。

AR5DBはこの種のモデル計算の結果を収録したもので、AR5に向けて実施された国際的な

モデル比較研究の成果が反映されている。計算結果は、モデルの前提条件の他に、モデル自体の定式化の違いにも依存する。このため、最近の研究では、複数の研究機関や研究グループがそれぞれモデルを持ち寄り、条件を揃えて計算した結果を相互に比較する方式で実施されることが多い。

以下では、公開されているデータ¹⁹から、CO₂排出量、放射強制力 (CO₂のみの寄与と非CO₂要因も含めた合計) および温度上昇について、2100年までのデータが完備しているものを抽出し、これらの要素の関係を調査する。この条件に合致するシナリオは523本である²⁰。表1と表2にシナリオ計算に使われたモデルおよび関係する研究プロジェクトを示す²¹。

AR5における排出削減シナリオの評価 (Clarke et al., 2014) は、2007年の第4次評価報告書 (AR4) における評価 (Fisher et al., 2007) と比べて、気候関連の情報が格段に充実している。AR4では濃度レベルと対応づけられる平衡状態の温度上昇が参照されるだけであったが、AR5ではMAGICC²²と呼ばれる簡易気候モデル (Meinshausen et al., 2011) によって、2100年までの温度上昇が確率論的に評価された。この評価では、一つのシナリオにつき、気候計算のパラメータを600通りに設定した計算が実行されている²³。本研究で抽出したシナリオは、実質

¹⁶ 環境省 長期低炭素ビジョン http://www.env.go.jp/earth/ondanka/lc_vision.html (アクセス日: 2018年2月1日)

¹⁷ 同論文には、直近の排出量を反映した2015年以降のCO₂バジェットも示されている。直近の排出量は年間で40 GtCO₂程度であり、上記の2011年以降の数値から160 GtCO₂を引くと2015年以降の数値になる。

¹⁸ この場合のシナリオは、人口や経済成長などの基本的な前提と、資源、技術、政策等の制約の下で、所定の目的関数を最大・最小化する最適化計算で得られる解である。

¹⁹ 2015年6月29日作成のバージョン1.0.2。
<https://tntcat.iiasa.ac.at/AR5DB/>から入手

²⁰ AR5DBには、31のモデル(バージョンの違いを区別すると56のモデル)で作成された延べ1,184本のシナリオが含まれている。抽出条件に合致しないシナリオは半数を超えるが、それらのほぼ全てが温度のデータを含んでいない。

AR5DBには、日本の統合評価モデルで作成されたシナリオも全体の1割程度を占めるが、いずれも温度のデータが含まれていない。

²¹ モデルはいずれも欧米の研究機関で開発されてきたもので、当該分野では長い実績がある。研究プロジェクトは一部を除き、欧米の研究機関が主導したモデル比較研究であり、ここでの抽出条件に合致しないものも含め、AR5DBに含まれるシナリオの大半を提供している。

²² Model for the Assessment of Greenhouse-gas Induced Climate Changeの頭文字をつなげた名称。IPCCの初期の評価報告書の頃から開発・改良が続けられており、統合評価モデルの研究分野では、事実上の標準手法となっている。

²³ MAGICCの確率論的な温度上昇の評価には、WG1分野の複雑な気候モデルの平均やばらつきが反映されている

表1 調査対象のシナリオの作成に使われた統合評価モデル

モデル名	バージョン	主研究機関
GCAM	2.0, 3.0, 3.1	米国 Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), University of Maryland
IMAGE	2.4	オランダ PBL Netherlands Environmental Assessment Agency
MERGE	ETL_2011, AME, EMF27	米国 Stanford University, Electric Power Research Institute (EPRI)
MESSAGE	V.2, V.3, V.4	オーストリア International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA)
REMIND	1.4, 1.5	ドイツ Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK)

表2 調査対象のシナリオが作成されたモデル比較研究

略称	名称	主管機関	代表論文	シナリオ数(**)
AME	Asian Modeling Exercise	米国 PNNL	Calvin et al. (2012)	23 (83)
AMPERE2	Assessment of Climate Change Mitigation Pathways and Evaluation of the Robustness of Mitigation Cost Estimates Phase 2	ドイツ PIK	Riahi et al. (2015)	159 (248)
AMPERE3	同Phase 3	ドイツ PIK	Kriegler et al. (2015)	63 (130)
EMF27	Energy Modeling Forum Program 27	米国 Stanford University	Kriegler et al. (2014)	122 (362)
GEA	Global Energy Assessment	オーストリア IIASA	Riahi et al. (2012)	42 (42)
LIMITS	Low Climate Impact Scenarios and the Implications of required tight emissions control strategies	イタリア Fondazione Eni Enrico Mattei (FEEM)	Kriegler et al. (2013a)	48 (84)
RCP	Representative Concentration Pathways	IAMC(*)	Moss et al. (2010)	4 (4)
RoSE	Roadmaps towards Sustainable Energy futures	ドイツ PIK	Kriegler et al. (2013b)	62 (105)

(*) Integrated Assessment Modeling Consortium: 統合評価モデリングに関する研究者コミュニティ
 (**) 括弧内の数値は抽出条件に合致しないものも含めた総数

AME (Calvin et al., 2012), AMPERE2 (Riahi et al., 2015), AMPERE3 (Kriegler et al., 2015), EMF27 (Kriegler et al., 2014), GEA (Riahi et al., 2012), LIMITS (Kriegler et al., 2013b), RCP (Moss et al., 2010), RoSE (Kriegler et al., 2013a)

的に、この600通りの気候計算が実行されたものに相当する。

3.1 累積CO₂排出量と温度上昇の関係

抽出されたシナリオについて、2011~2100年の累積CO₂排出量を基に特徴を整理した結果を図3に示す²⁴。シナリオの多くは温度上昇(600通りの計算の中央値)が2°Cを下回るところに集中し、全体的に温度上昇と累積CO₂排出量が直線関係にあることを確認できる(図3b)。

WG3のAR5では、2100年のGHG濃度²⁵を指標にシナリオが分類されている(図3a)。シナリオ

が集中するところは、GHG濃度レベルでは450~550 ppm-eqに当たる。450 ppm-eqは従来から2°C目標の目安とされ、550 ppm-eqは産業革命前の濃度の約2倍である。450~550 ppm-eqは、これまでのモデル比較研究で共通の前提条件とされることが多く、表2に挙げた研究でも同様の条件が多く採用されている。

図3cには、2100年の放射強制力と累積CO₂排出量の関係を示している。温度上昇は放射強制力によって生じるため、CO₂と非CO₂要因を合わせた全放射強制力(図中の四角印)は、図3bの温度上昇の分布形状と良く対応する。これら

(Meinshausen et al., 2009; Rogelj et al., 2012; Schaeffer et al., 2015)。したがって、AR5DBの各シナリオにおける排出量と温度上昇の関係は、基本的に、WG1の科学基盤と整合的と見なせる。

²⁴ シナリオのデータは、大半が10年間隔のモデル出力値であるため、累積値は、2010~2100年の10年間隔の値に、5, 10, ..., 10, 5年の重みをつけて積算している。

²⁵ CO₂とCO₂以外の要因の放射強制力を合計して、それをCO₂のみの濃度増加の寄与として換算される濃度。単位は、CO₂濃度のppmと区別して、ppm-eqのように表記される。エアロゾルはGHG(温室効果ガス)ではないが、エアロゾルの放射強制力を含む場合もGHG濃度とされる。

の分布では、一部に直線関係からのずれが見られ、全放射強制力の内訳では、非CO₂要因（図中三角印）がそのずれに関係することを確認できる。CO₂のみの放射強制力（図中丸印）が累積CO₂排出量とともに直線的に増加するのは、2.1で述べた相殺関係による²⁶。

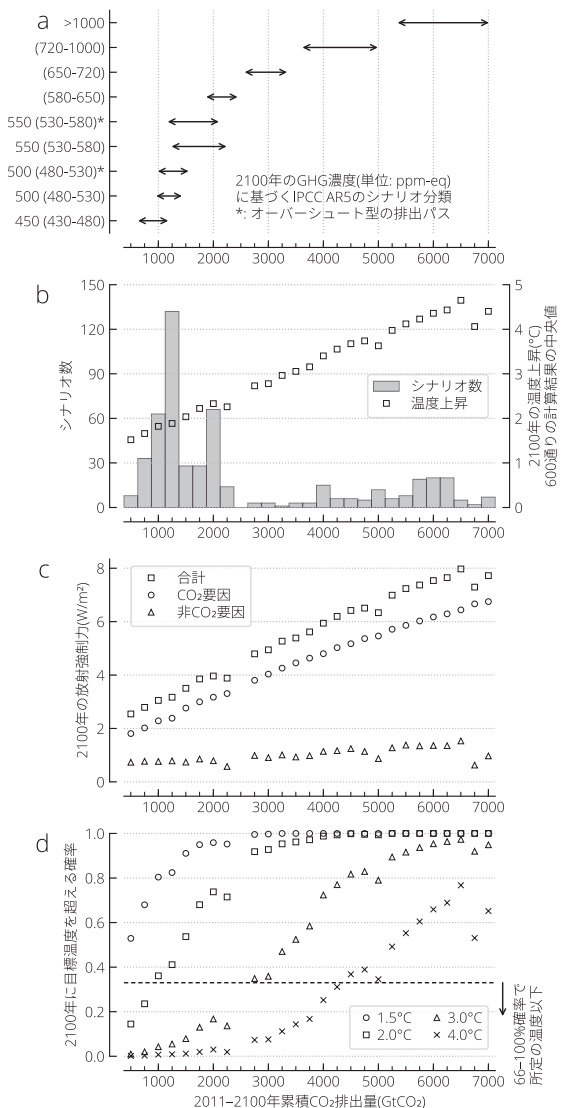
MAGICCによる600通りの気候計算には、気候感度に代表される温度上昇と放射強制力間の不確実性が考慮され、計算結果の分布から所定の温度レベルを超える確率が評価される。AR5DBには、図3bに示した中央値の他に、上位・下位5%の値や1.5、2.0、3.0、4.0°Cを超える確率の情報が含まれる。図3dには、この超過確率が累積CO₂排出量とともに増加する様子を示している。

IPCCの評価報告書では、可能性の度合いを表す用語が確率で定義づけされる。例えば、「可能性が高い (*likely*)」は66%より大、「可能性が低い (*unlikely*)」は33%より小とされる。この定義にしたがうと、2100年時点で所定の温度レベル未達となる可能性が高い累積CO₂排出量は、図で超過確率0.33を示す破線より下に位置するマーカが該当する。非CO₂要因による増減があるが、2°Cの場合は概ね1,000 GtCO₂がその上限に位置しており、2.2で述べたCO₂バジェットに関する既往の知見と合致する。

3.2 2°C目標の達成確率の違いが排出量におよぼす影響

2°C目標の達成確率が変われば、許容されるCO₂排出量も変わる。そこでIPCCの可能性表記にしたがって、66~100% (>66%)、50~66% (>50%) および33~50% (>33%) という3種類の達成確率幅を設定し、21世紀を通じて温度上昇が2°C未満となる確率がそれぞれの範囲に収

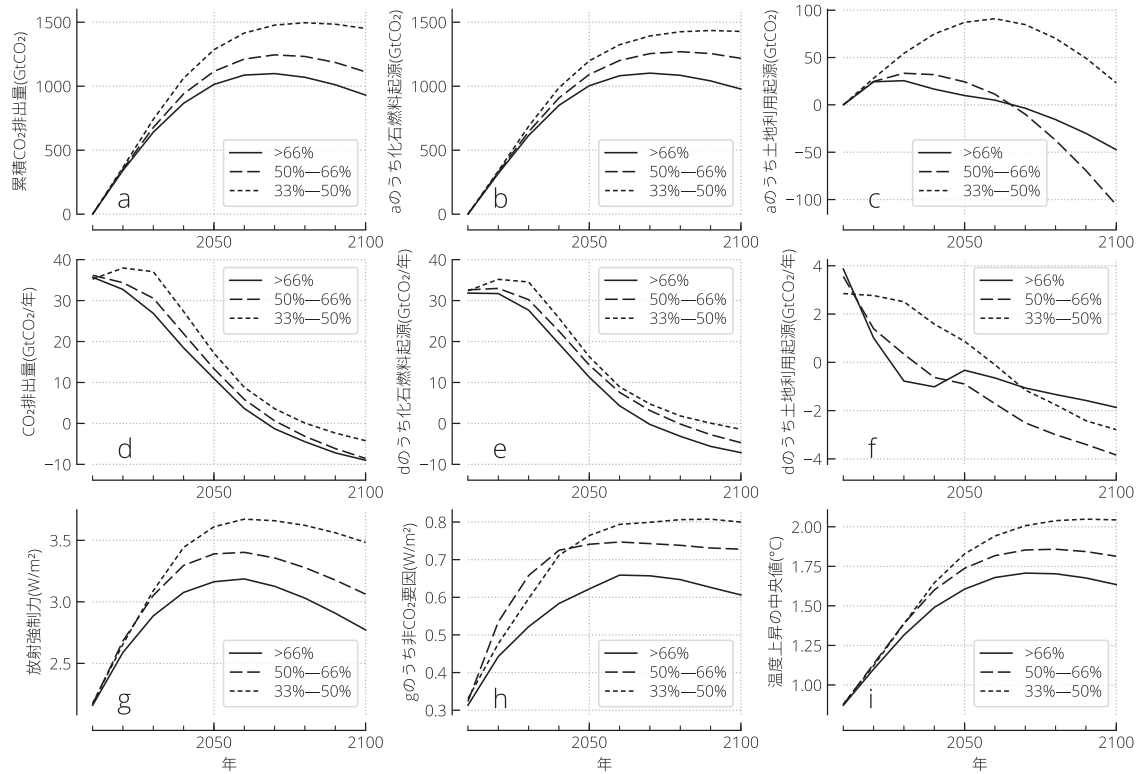
²⁶ CO₂の放射強制力は、CO₂濃度に対して対数的にしか増加しないが、累積排出量とともにAF（排出されたCO₂のうち大気中に残存する割合）が増加するため、結果的に直線に近づく（図2aとbの相殺関係）。AFの値は、排出量が少ない方



a: 2100年のGHG濃度で分類されたWG3AR5のシナリオカテゴリとの対応。b: シナリオ数のヒストグラムおよび2100年の温度上昇の分布。温度上昇は簡易気候モデルMAGICCによる600通りの計算結果の中央値。c: 2100年の放射強制力（各要因の合計およびCO₂要因とそれ以外の内訳）。d: 所定の温度水準を超える確率の分布。点線は33%確率のラインで、その下側が66%を超える確率で所定の温度以下となることを示す。b~dの各マーカは、250 GtCO₂の幅で区切られたヒストグラムの各ビンに含まれるシナリオの平均を示す。

図3 2011~2100年の累積CO₂排出量を基に整理したAR5DBの特徴

の左端点で0.34、多い方の右端点で0.61である。前者の場合は、図2cに示される海洋の熱慣性とCO₂吸収との相殺関係もはたらく。



a: 2011 年以降の累積 CO₂ 排出量。b, c: a の内訳で、b が化石燃料起源 c が土地利用起源。d~f: a~c に対応する年別の CO₂ 排出量。g: 全放射強制力。h: g に占める非 CO₂ 要因の放射強制力。i: 温度上昇の中央値。

図 4 21 世紀を通じて 2°C 未満となる確率が 66~100% (>66%)、50~66% (>50%) および 33~50% (>33%) の範囲に収まるシナリオの平均的な変化傾向

まるシナリオを抽出して比較する。シナリオ数はそれぞれ76、109、91本である。図4にこれらのシナリオにおけるCO₂排出量、放射強制力、および温度上昇の平均的な変化傾向を示す。排出量は、化石燃料起源と土地利用起源の内訳をつけ、合計と内訳のそれぞれで2011年以降の累積値と年別の値を示している。

年別の排出量は、確率の大きさによらずゼロ排出に向かうが、大幅削減が本格化する時期は確率が低いほど遅れる(図4d)。この結果、累積排出量は確率が低いほど上積みされる形となる。いずれも今世紀末の排出量は負となり、累積値はそれ以前の今世紀後半にピークがくる²⁷。66~100%と50~66%の場合は、33~50%と比べ

て負排出に達する時点が早く(2070~80年)、2100年の排出量は、化石燃料起源と土地利用起源を合わせて、マイナス9 GtCO₂に達している(図4d)。これは2010年の排出量の約1/4に相当する。

内訳では、土地起源のCO₂排出量について、66~100%と50~66%の間で特徴的な違いがある(図4f)。66~100%では今世紀前半に急速に負排出となり、2050年に一旦ゼロ付近に戻った後、今世紀後半は再び減少する。これに対し50~66%では、期間を通じてほぼ同じスピードで減少し、今世紀後半は確率66~100%の場合より負排出の度合いが大きくなっている。このような土地起源の排出量のやや一貫性を欠く傾

²⁷ なお、負排出、すなわち世界全体の CO₂ 排出量を正味で負にする技術については、バイオエネルギー(bioenergy)と CO₂ 回収・貯留(carbon dioxide capture and storage: CCS)を組み合わせる BECCS などが想定されるが、実証されたものではな

く、実現可能性については議論がある(Fuss et al., 2014; Smith et al., 2016)。

向は、モデル毎の特徴が顕在化した結果と見られる²⁸。

図4aと図4iの比較から確認されるように、温度の変化傾向は、CO₂の累積排出量の変化傾向と類似する。今世紀後半の負排出によって、66～100%や50～66%のシナリオでは、温度上昇が2100年以前にピークとなり、2100年時点では低下傾向となる。このように、21世紀中に2100年の値を超過する「オーバーシュート」も、累積CO₂排出量と温度上昇で同様に見られる。

温度変化の直接の原因となる放射強制力は、図4gと図4hに示されるように、全量および非CO₂要因とも2060年まで増加し、その後は減少もしくはほぼ一定で推移する。増加の割合は非CO₂要因の方が相対的に大きく、全体に占める非CO₂要因の割合は、初期時点の15%程度から22～24%程度まで増加する。この増加のスピードは、確率区分50～66%で他より早い傾向が見られる。図4iとの比較から、世紀末にかけての全放射強制力の減少は、必ずしもそれに見合う温度低下をもたらさないことを確認できる。これは2.1で言及した海洋の熱慣性による。

3.3 各確率区分における温度上昇の分布

前項では66～100% (>66%)、50～66% (>50%)、および33～50% (>33%) という3通りの確率区分に沿って、2°C未満となるシナリオの平均的な傾向を比較した。以下では各区分に含まれるシナリオがどのあたりの確率に集中している

のかを分析する。

図5に、2°C未満の確率と温度上昇（600通りの計算の中央値）の関係を個々のシナリオで見た散布図を示す。21世紀の全期間を通じて確率66～100%、50～66%および33～50%で2°C未満となるシナリオは、図5aに示すように、ピーク時の温度上昇が約1.8°Cと2°Cを境に区分されている（これらの温度を境に、凡例に示した記号が変わっている）。50%を境とする区切り（凡例に示した○と×の境目）が2°Cに当たるのは定義によるが、1.8°Cの方は確率が一意に定まっていない。この温度付近にはシナリオが集中しており、1.8°C程度に対応する確率は10%程度の幅にわたって分布している²⁹。

2°C未満となる確率の区分別の中央値は、確率区分の高い方から順に75、62、41%である。中央値の周りの分布状況は、図5aの凡例に示した記号の分布と、それを集約した図右側のボックスプロットから把握できる。IPCCの評価報告書などでは、確率は>66%や>50%のように区分の下端で表記されるが、確率の表記が同じでもサンプルの取り方でシナリオの仕様は変わり得る。AR5DBでは、区分内の分布は必ずしも均等ではなく、特に50～66%では中央値が高い方に偏り、その中央値付近に分布が集中する傾向が見られる。また、33～50%の区分との境界は、分布が疎らになっている。

2°C未満の確率と温度上昇の中央値を2100年時点で見ると（図5b）、負排出による温度低下

²⁸ 図には示していないが、2100年の排出量は、特定のモデル（MESSAGE）で大きな負の値を示し、50～66%のシナリオでは、そのモデルの占める割合が突出している。また、世紀前半の排出量は、別の特定のモデル（GCAM）で極端に大きな負の値を示している。このモデルは50～60%のシナリオが少なく、66～100%の場合のみにその傾向が現れる。土地部門のCO₂は、森林伐採や植林によって比較的大きな排出や吸収が生じる。大規模な植林は負排出の技術にも位置づけられる（Smith et al., 2016）。このような森林の扱いは現状ではモデル間の違いが大きく、シナリオの選び方によって比較的大きな差異が生じる。

²⁹ 確率66～100%のシナリオは、温度上昇が世紀後半の早い時

期にピークとなるものが大半である。図には示していないが、中央値1.8°Cのあたりで2°C未満となる確率が比較的低いシナリオは、温度上昇のピーク後の減少幅が大きいことを確認できる。これは、世紀前半の排出削減を遅らせて、世紀末にかけて大規模な負排出を導入する、オーバーシュートの割合が強いシナリオである。負排出技術の実現性はともかくとして、ピーク気温の時期が短ければ、同じ気温が続く場合と比べて、2°C未満の確率は小さくなる。これは、気候の不確実性の中に、放射強制力に対する応答の遅れに関する要素があり、ピークに近い気温の持続性が確率に影響すると解釈できる。

を反映して、確率が全体的に高くなる。区分別の中央値は、確率区分の高い方から順に81、65、45%であり、図5aの21世紀を通して2°C未満となる確率より3~6ポイント大きい。50~66%の区分は、2100年時点では約半数が66%を超える確率で2°C未満となり、一部は>66%の区分と重なっている。

4. CO₂要因と非CO₂要因の分解

2章と3章で言及したように、温度目標と排出削減の整合性には非CO₂要因が少なからず影響する。ここでは、温度上昇をCO₂要因と非CO₂要因に分解して、シナリオ間のばらつきを分析する。要因別の温度上昇は、AR5DBに含まれる放射強制力の情報を基に、著者が開発した簡易気候モデル (Tsutsumi, 2017) で推計した (付録を参照)。

図5に示したシナリオに対し、温度上昇とその要因を分析した結果を図6に示す。

元の温度上昇と累積CO₂排出量の分布範囲を見てみると、比例関係から外れるシナリオが目立つ (図6a)。特に累積排出量が1,200 GtCO₂のあたりにはシナリオが集中し、温度上昇が広い範囲におよんでいる。これに対し、CO₂起因の温度上昇は累積CO₂排出量との比例関係に近づき (図6d)、非CO₂起因の温度上昇は非CO₂の放射強制力にほぼ比例することを確認できる (図6c)。したがって、1,200 GtCO₂付近のばらつきも含め、累積CO₂排出量に関する比例関係からのずれは、大部分が、累積CO₂排出量とは必ずしも直接関係しない非CO₂要因のばらつきに起因すると見られる³⁰。

³⁰ エアロゾルに関係する大気汚染物質の排出は、CO₂の排出と連動する部分があるが、硫酸エアロゾルが寒冷化、黒色炭素 (煤) が温暖化に寄与するなど、放射強制力についてのCO₂との関係は一律ではない。主に農業部門から排出されるメタンや一酸化二窒素は、土地改変に伴うCO₂排出と連動する部分があるが、エネルギー起源のCO₂排出とは直接関係しない。

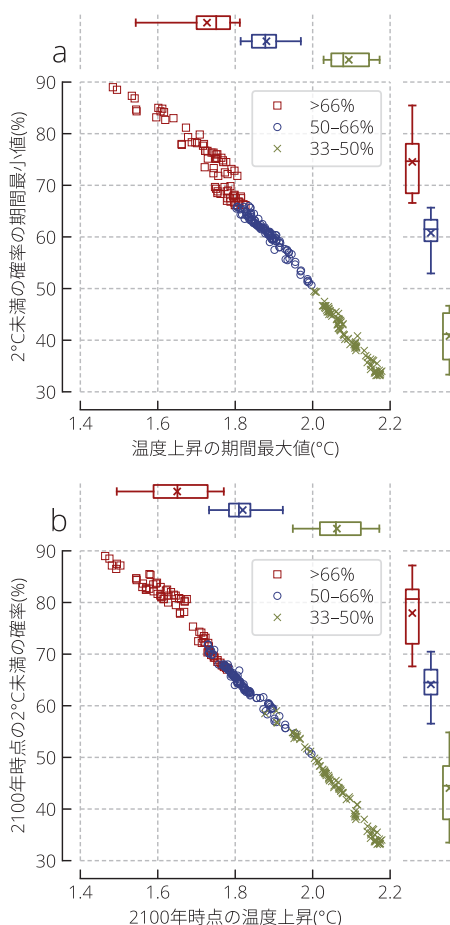


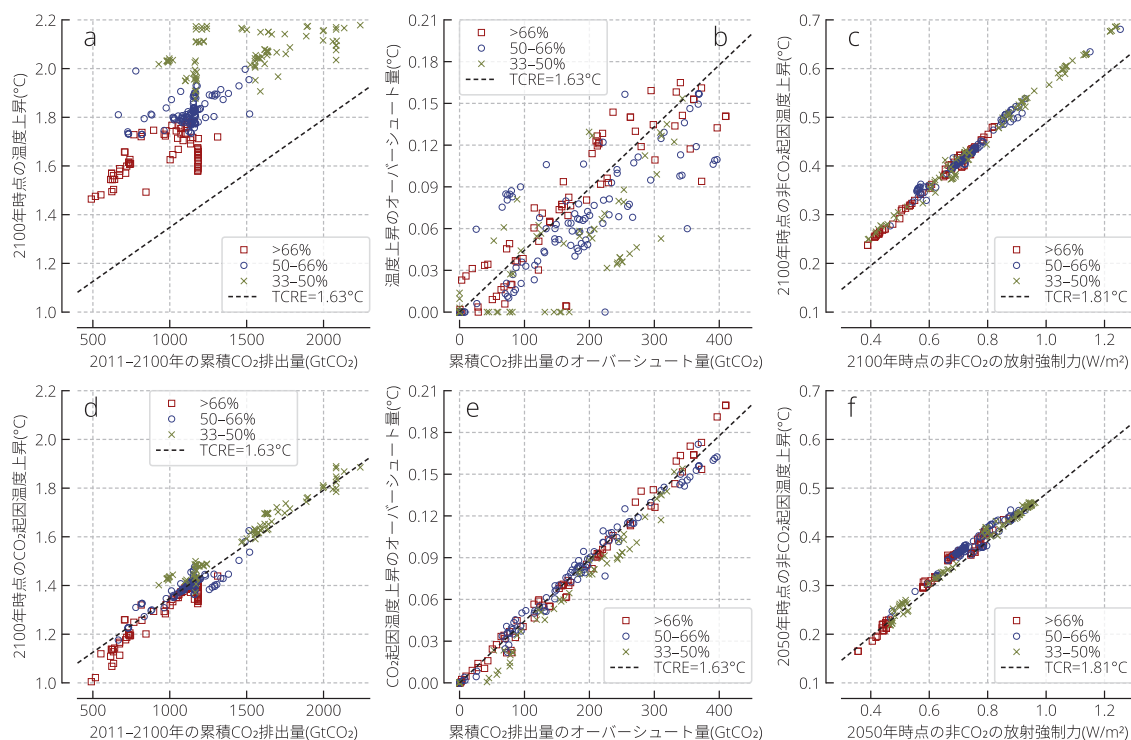
図5 2°C未満の確率と温度上昇 (中央値) の関係

散布図の上側と右側のボックスプロットは、対応する軸の値について、凡例に示す三つのシナリオ区分での5、25、50、75、95%の分位点と平均 (×印) を示す。a: 21世紀を通しての確率 (期間最小値) とピーク時の温度上昇 (期間最大値) の関係。b: 2100年時点の確率と温度上昇の関係。大半のシナリオは2100年より前に温度のピークがくる (オーバーシュートする) ため、bの方が全体的に温度上昇の中央値が低くなり、2°C未満の確率が高くなる。

要因別の温度上昇は以下のように定量的に評価できる。

CO₂要因の温度上昇については、図6dの中で黒の点線で示す回帰直線³¹が得られ、その傾き

³¹ 横軸の値に2011年までの累積CO₂排出量として約2,000 GtCO₂を加え、原点を通る直線の条件で回帰係数を算出した。約2,000 GtCO₂は1750~2011年の累積排出量で、WG1 AR5の評価値に基づく。WG1 AR5では、気候モデル計算の結果の分析で、1870~2011年の約1,900 GtCO₂が参照されるが、ここでは産業革命前の1750年を起点とした。



a, d: 2100年時点の温度上昇と2011~2100年の累積CO₂排出量の関係。b, e: 温度上昇のオーバーシュート量と累積CO₂排出量のオーバーシュート量の関係。dとeの温度上昇は、独自の簡易気候モデルを用いてCO₂起因部分を切り分けた推定値。オーバーシュート量は2100年時点の値を21世紀中に上回る量を表す。c, f: 2100, 2050年時点の非CO₂起因の温度上昇と非CO₂の放射強制力との関係。a, b, d, eの黒の点線は、TCREに基づく温度上昇。TCREの値(1.63°C)は、dのデータ分布を直線回帰した結果。c, fの黒の点線は、TCRに基づく温度上昇。TCRの値(1.81°C)は、要因切り分けに用いた簡易気候モデルの設定値(AR5DBで使われたMAGICCの設定と同様)。

図6 確率33~100%で2°C未満となるシナリオに対し、
温度上昇(中央値)とその要因を分析した結果

からTCREが1.63°Cと推計される³²。2.1で述べたように、TCREは3,670 GtCO₂当たりの温度上昇であり、各シナリオの累積CO₂排出量に対し、CO₂要因の温度上昇が比例式から求まる。例えば、現在の世界の年間排出量が10年続くと400 GtCO₂程度になり(脚注17)、それによる温度上昇は約0.18°Cに相当する。

TCREによる推計は、負排出によって温度が低下する場合にも適用できる。最終時点の2100年の値をそれ以前に上回る量をオーバーシュ

ート量とし、温度上昇と累積CO₂排出量の関係をオーバーシュート量について見ると、この場合も、元の温度からCO₂要因を切り分けることで、TCREとの比例関係が良く成立するようになる(図6e)³³。

一方、非CO₂要因の温度上昇は、世紀後半の非CO₂の放射強制力との比例関係(図6c, f)から定量的に評価できる。比例定数としては、過渡状態の温度上昇の指標となるTCRが目安になる。ただしTCRに基づく温度上昇は、2050年

³² この値はAR5で評価されたTCREの不確実幅(0.8~2.5°C、2.2参照)のほぼ中央に当たる。したがって、AR5DBの温度上昇は中央値ベースでTCREの評価と整合することを確認できる。

³³ 元の温度は、TCREに基づく推定値の上下に分布している(図6b)。このうち上側の分布は、非CO₂要因もピーク後

に大幅に減少することを意味する。このようなシナリオは、確率66~100%の区分に多く見られ、この区分の平均的な傾向(図4h)を反映している。

時点では良い近似になるものの(図6f)、2100年時点では過小評価となる(図6c)。これは、非CO₂の放射強制力が今世紀前半に増加し、後半はほぼ一定で推移もしくは減少する傾向(図4h)にあることが関係する³⁴。

平衡時の温度上昇の指標となるECSに対し、TCRは6割程度の大きさである。したがって、TCRによる近似が良い2050年時点では、その放射強制力で安定した場合に想定される温度上昇の6割程度が顕在化する勘定となる。2100年時点は、近似値とのずれから、この割合が7割程度に増加していると見られる。この場合、非CO₂の寄与は0.3 W/m²当たり0.17°C程度となる。0.3 W/m²はAR5DBの2010年値(図4h)であり、現在の目安となる。

5. UNFCCC事務局と国際エネルギー機関(IEA)によるシナリオとの比較

UNFCCC事務局や国際エネルギー機関(International Energy Agency: IEA)による2°C目標シナリオもAR5DBのシナリオを参照している(UNFCCC, 2016; IEA, 2016a)。ここでは化石燃料起源のCO₂排出量に注目して、代表的な排出削減シナリオとして、UNFCCC事務局が用いた費用最小2°Cシナリオ(Least-cost 2°C scenarios)とIEAによる450シナリオを取り上げ、AR5DBと比較する。

5.1 UNFCCCレポートの費用最小2°Cシナリオとの比較

費用最小2°Cシナリオは、AR5DBの確率66~100%で2°C未満の区分に含まれる20本のシナリオからなる(UNFCCC, 2016 Technical Annex Table 4)。費用最小は排出削減の期間を通しての最小化を意味し、20本のうち14本は2010年以

降、残りの6本は2020年以降がその期間に該当する。元のAR5DBで同区分に含まれるシナリオは76本である(3.2節)。20本の抽出基準は必ずしも明確ではないが、表1に挙げたMESSAGEを除く4つのモデルがほぼ均等に選択され、表2に挙げたモデル研究のうち、AMPERE2とLIMITSの成果が比較的多く採用されている。

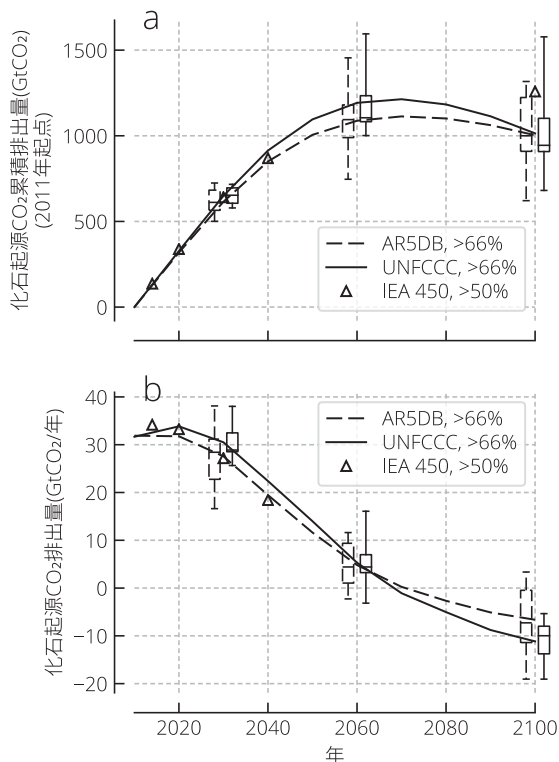
2011年以降の累積排出量と年別の排出量について、抽出された20本と元の76本の傾向を図7で比較する。それぞれの平均は、2011~2100年の累積量についてはほぼ等しいが、抽出された20本の方が、オーバーシュートの度合いが大きい(図7a)。このため20本平均の年別の排出量は、全体平均と比べて、最初のうちは排出量が多く、2060年を境に逆転し、世紀末にかけてより大幅な負排出となる(図7b)。

抽出された20本の平均は、2020年をピークに減少に向かうが、2030年は2010年を僅かに(約4%)下回るほどである。ただしこの傾向は、土地起源を加えた総CO₂排出量や、他のGHGのCO₂相当量を加えたGHG排出量では様相が異なる。この違いは、20本の抽出シナリオだけではなく、全体平均の場合にも当てはまり、図4fに示したように、土地起源のCO₂排出量が2010~30年に大きく減少することが関係する。減少の度合いは、2°C未満の確率区分の中で66~100%の場合が特に顕著で、図には示していないが、抽出された20本はさらにその傾向が強い。

UNFCCCレポートで示されるのはGHG排出量のみで、そこで言及される各国の目標を積み上げた排出見通しについても、GHG排出量での比較に留まっている。3.2で述べたように、土地起源のCO₂排出は、モデル間のばらつきが大きいところであり、シナリオの選定によって、特定のモデルの傾向が強調されやすい面がある。

³⁴ TCRに基づく温度上昇は、その定義により、放射強制力が増加する期間では良い近似となるが、増加が鈍り安定期に

入ると、徐々に平衡温度に近づくためにずれが生じる。



a: 化石燃料起源の累積CO₂排出量。b: その年別の排出量。AR5DBとUNFCCCのシナリオは、それぞれの平均の時系列と、シナリオ間のばらつき(5, 25, 50, 75, 95%の分位点)を表すボックスプロット(2030, 2060, 2100年のみ)を示す。IEAのシナリオは2040年までだが、2100年の想定される累積排出量も示している。

図7 確率66~100%で2°C未満となるAR5DBのシナリオ、UNFCCCレポートで費用最小2°Cシナリオとして抽出されたシナリオおよびIEA 450シナリオの比較

UNFCCCレポートはこうしたシナリオと各国の目標の積上げを、GHG排出量という一つの数値だけで比較しているが、内訳も含めて比較するなど、より多面的な分析が望ましい。

5.2 IEAによる450シナリオとの比較

IEAのシナリオは2040年までの期間が対象であるが、長期の気候目標を想定するシナリオでは、2100年までの排出量の見通しが考慮されている。450シナリオの場合は、元々GHG濃度450 ppm-eqを目指す前提であったが、パリ協定採択後の2016年のレポート(IEA, 2016a)で、確率>50%で21世紀中に2°Cを超えないシナリオと再定義された。根拠となるのはCO₂バジレットの水準で、2015~2100年の累積CO₂排出量が1,140 GtCO₂と想定されている。この値は、同じ仕様に対してAR5DBから見出される1,150~1,400 GtCO₂(IPCC, 2014 Table 2.2)や、それを2015~2100年に換算した990~1,240 GtCO₂(Rogelj et al., 2016)の間に位置するとされる³⁵。

図7には、レポートに掲載されている2014、2020、2030、2040年のデータおよび2100年の累積値を示した³⁶。2040年までの450シナリオの傾向は、AR5DBの確率66~100%で2°C未満となるシナリオとほぼ一致する。両者は2°C未満の確率が異なるが、これは2100年の累積CO₂排出量の違いによる。IEAでは負排出技術について慎重な立場をとっており、他の野心的な排出削減シナリオも含めて、オーバーシュートが想定されない。つまり年別の排出量は、2040年以降、自然な形で正味ゼロに向かう経路が想定されている³⁷。

またIEAレポートでは、非CO₂要因の排出の多くが農業や廃棄物などの非エネルギー部門によること、さらにその変動がCO₂バジレットの下でのエネルギー起源のCO₂の排出量に影

³⁵ なおIEAの2017年のレポート(IEA, 2017)では、450シナリオに相当するものとして、新しくSustainable Development Scenario (SDS)が提示された。SDSでは、長期の気候目標に加えて、国連の持続開発目標のうち、2030年までの電気の利用普及ならびに大気汚染の改善という短期目標との同時達成が前提とされている。SDSの世界合計のCO₂排出量は450シナリオとほぼ同じで、確率>50%で2°C未満という仕様も変わらない。

³⁶ 掲載データはエネルギー起源の排出量であるため、ここでは、レポートの記載内容に基づいて、各時点の工業プロセス

起源の排出量を2,2,2,0 GtCO₂と仮定し、これを合算して化石燃料起源の総排出量とした。累積量は台形則にしたがって積分し、2100年は、上記の2015~2100年の数値に、2014年の4倍を2011~14年の累積量として加算している。

³⁷ ただし負排出技術の可能性についての言及もあり、BECCSなどを相当規模利用できるとすれば、450シナリオはより厳しい気候目標達成の可能性を提供する、という認識を述べている。

響することなどから、非CO₂要因の想定に注意を払っている。そこではAR5DBを参照して、少なくとも50%の確率で2°C未満となるシナリオの8割以上は、2100年の非CO₂起因の温度上昇が0.4~0.7°Cの範囲にあると分析し、450シナリオの非CO₂の寄与を約0.55°Cと設定している(IEA, 2016b)³⁸。

IEAの2100年時点の考え方は、現在の科学基盤に合致するが、そこで分析された非CO₂起因の温度上昇は、本研究で独自の簡易気候モデルを用いて推定した結果(図6c)と比べると過大である。実際、0.4~0.7°Cの範囲には33~50%の確率区分のシナリオも多く含まれ、少なくとも50%という条件に当てはまらない³⁹。

いずれにしろ、1.5~2°Cの水準になると、非CO₂要因の寄与が相対的に大きくなる。その結果、非CO₂の放射強制力の僅かな違いが、目標達成の確率やCO₂バジェットを左右することになる⁴⁰。

5.3 両シナリオの比較—特にオーバーシュートについて

ここでUNFCCCレポートにおけるシナリオとIEAの450シナリオについて、オーバーシュートの観点から簡単に比較しておく⁴¹。5.1で述べたように、UNFCCCの費用最小2°Cシナリオはオーバーシュートの度合いが大きく、一方5.2で述べたように、IEAの450シナリオはオーバーシュートが想定されない。その結果、前者の方

が世紀前半で化石燃料起源のCO₂排出量が多いにもかかわらず最終的に2°C未満の確率が高い、という一見矛盾する違いが生じる。両者の違いは今世紀の前後半での排出量の割当の違いが本質であるが、温度のピークが尖鋭であるほど、同じピーク値であっても目標達成の確率が高くなることも関係する。

6. 結論

本稿では、パリ協定に記載された温度目標と長期の排出削減について、AR5の知見を基にAR5DBの気候関連データを精査し、代表的な2°Cシナリオの事例も含めて多面的に考察してきた。以下では、6.1で温度目標と整合的な長期削減についての本稿の考察を整理した上で、6.2で2050年や2100年に向けた長期の政策・戦略への示唆を述べる。

6.1 温度目標と整合的な長期削減

温度上昇と累積CO₂排出量の比例関係は直感的には理解しやすいが、温度上昇の要因を細かく整理して考えると実は自明ではない。両者の間の比例関係は原理的に成立するというより、様々な要因が重なり合った結果として、いわば偶然に成立するものである(2.1、特に図2)。また、CO₂以外の温室効果ガス等をCO₂と同様に扱うことはできない(2.2)。

この比例関係および非CO₂要因でもたらさ

方であるが、その意味するところを十分に認識する必要がある。

³⁸ ただし、大幅なCO₂削減を目指すシナリオでどこまで非CO₂要因を削減できるかは、情報がほとんどなくAR5DBに依拠するしかない、という状況にも言及している。

³⁹ 詳細は不明だが、仮に、2100年の放射強制力に対する平衡時の温度上昇が想定されているとすれば、数値の上では整合的となる。つまり、実際のシナリオデータは、4章で見たように、平衡時の7割程度であり、0.4~0.7°Cから3割程度を過大分として差し引くと、図6cに示される傾向と整合する。

⁴⁰ 非CO₂要因を平衡時の温度上昇と想定することは、2100年の放射強制力が、それ以降も一定のまま推移することを前提に、数百年後の遠い将来の温度上昇を見越して、今世紀のCO₂バジェットを決めることを意味する。これも一つの考え

⁴¹ 本研究の分析では対象としなかったが、統合評価モデルの最適化計算では、初期時点の近傍の制約が、オーバーシュートの傾向に影響する面がある。初期時点では、通常、実際の排出量が制約条件となる。このため、例えば、計算を2000年から開始する場合と2010年から開始する場合とでは、後者の方が現実の排出増加が反映されて、オーバーシュートの傾向になりやすい。今後IPCCの1.5°Cに関する特別報告書やその後のAR6に向けて、AR5DBを拡充・代替する新しいシナリオデータベースが作成されると見込まれる。その際は初期時点の扱いの違いにも留意する必要がある。

れる温度上昇の特徴を考慮すれば、現在から将来に至るまでの世界全体での排出量の推移（＝排出シナリオ）が2100年時点において温度目標に整合するかどうかは、その時点での累積CO₂排出量と非CO₂要因の加熱効果（放射強制力）でほぼ決定される（2.2および4）。

ただし気候の見通しに幅があるため、その整合性には確率の情報が付随する。ある排出削減シナリオの下での温度上昇の見通しで、幅の中央が2°Cであれば2°C未満の確率は50%となる。この確率を高めて目標達成をより確実するには、排出量をさらに減らす必要がある（3.1、特に図3）。

どの程度減らすかは、「目指すべき達成確率」と「温度の見通しの幅」に依存する。「目指すべき達成確率」は政策的な判断により、確率を高くすると、大幅削減の本格化する時期が早まる（3.2、特に図4）。一方、「温度の見通しの幅」は科学的な知見に基づいて評価される。現行の科学基盤では、温度上昇の中央値が1.8°C程度のシナリオで、2°C未満の確率が66%程度になる（3.3、特に図5）。

2100年の温度上昇の中央値は、その時点での累積CO₂排出量と非CO₂放射強制力から概算できる。累積CO₂排出量は400 GtCO₂当たり、非CO₂放射強制力は0.3 W/m²当たり⁴²、ともに中央値で見て、0.17～0.18°C程度の温度上昇に対応する。400 GtCO₂は、化石燃料起源（エネルギー利用と工業プロセス）と土地起源を合わせた、現在の排出量の10年分に相当する（4、特に図6）。本稿では2°C目標に注目したが、これらの定量的な関係から、1.5°Cなどの目標に整合する数値も割出せる。

累積CO₂排出量と非CO₂放射強制力の今世紀中の時間変化には、現実社会の様々な要因が反映される。この仕組みは、統合評価モデルによって定式化され、費用最小などの制約条件の下

で、CO₂排出量等のシナリオが計算される。モデルの定式化には様々な方式があるため、シナリオ計算は国際的なモデル比較研究の形で実施される。AR5DBはAR5の時点のモデル比較研究の成果を集めたシナリオデータベースである。近年、2°C目標の重要性が認識されるなかで、UNFCCC事務局やIEAといったエネルギー・環境を扱う国際機関が2°Cシナリオ分析を積極的に行うようになっているが、その際には、このデータベースが参照されている（5、特に図7）。

6.2 政策への示唆

本稿で扱ったのは温度目標と長期削減の関係であり、それだけをもって長期的な政策や戦略のあり方を論じることはできない。一方で、そうした政策・戦略を考えるにあたって、温度目標と長期削減の関係を無視することもできない。以下では、長期的な削減に向けた政策や戦略を考える際に、温度目標との関係について留意すべきことを3点指摘する。

①CO₂バジェット

パリ協定4条1で言及される、GHGの人為的な排出と吸収のバランスは、温度目標との関係を科学的に考慮すると、CO₂に関しては、累積的な排出量のある限度に抑える、すなわちゼロ排出を目指すことに相当する。基盤となる温度上昇と累積CO₂排出量の比例関係は、ある程度の頑健性があり、従来のGHG濃度に基づく考え方より、直接的で分かりやすい。

ただし、2°Cなどの温度目標に整合的な排出量は、6.1で整理したように、目標達成の確率と非CO₂要因の想定に左右され、非CO₂要因の排出量をCO₂と同様の比例関係の枠組みで考えることはできない。したがって、長期戦略などでCO₂バジェットに言及する場合、確率と非

放射強制力の合計の目安である（4章および脚注12参照）。

⁴² 0.3 W/m²は、CO₂を除くGHGとエアロゾルを含めた現在の

CO₂放射強制力の想定も明示しておくのが適切である。

②科学的知見の更新可能性

TCRやTCREといった指標で定量化される気候の見通しの幅は依然として大きい(2.1, 2.2)。上記の中央値1.8°Cで2°C未満の確率66%という評価は、あくまでも現行の見通し幅の場合である。

数百年後に到達する平衡時の温度上昇を特定するのは難しいが、今世紀中に生じる温度上昇は、観測データの蓄積とともに徐々に幅が狭まり、TCRとTCREの確度も高まる。

そうすると、確率66%で2°C未満とする際の中央値が2°Cにより近くなり、CO₂バジェットは増加する。温度上昇の見通しは、幅が縮まるだけでなく、幅自体が上下に振れる可能性もある。観測情報と気候モデルを組み合わせる気候感度の幅を特定する最近の研究では、上振れと下振れの両方の可能性が示唆されている(Brown and Caldeira, 2017; Cox et al., 2018; Goodwin et al., 2018)。上振れする場合にはCO₂バジェットは減少し、下振れする場合には増加する。

長期的な政策・戦略を考える際には、科学的知見の更新によって、CO₂バジェットなど、政策上の変数も変わりうることに留意すべきである⁴³。

③シナリオデータベース使用時の注意点

具体的な長期の排出削減の戦略において、AR5DBなどのシナリオデータベースは重要な役割を担う。ただし、データベースからリファレンスとなるシナリオを選択する際の基準には任意性があり、さらにデータベースの構成自

体も、研究機関がモデル比較研究に参加するかどうかという機会の有無に依存する。

本稿で見てきたように、66%を超える確率で2°C未満といっても66~100%の幅があり、AR5DBでは中央をとると75%である。50%を超える場合の50~66%の区分では、上位側への偏りが見られる。また、モデル間のばらつきが大きい土地起源のCO₂排出は、特定のモデルのくせが表れやすいところである。このため、確率区分をその下限値だけで言及することや、特定の要素のみに注目してシナリオを評価することは、誤った認識につながる恐れがある。シナリオを参照する際は、その選択に注意を払うとともに、確率の値やシナリオの要素を多面的に見る必要がある。

謝辞

本研究で用いた簡易気候モデルのパラメータ調整および温度上昇と累積CO₂排出量の比例関係の説明は、それぞれ文部科学省の「気候変動リスク情報創生プログラム」(2012~16年度)および「統合的気候モデル高度化研究プログラム」(2017~21年度)の支援の下に実施した。

付録 温度上昇の要因分解について

温度上昇の要因をCO₂とそれ以外に分解する方法には、放射強制力の変化から温度上昇を簡易的に計算する数値モデルを用いた。この種の簡易計算では、熱容量の大きい海洋内部の熱輸送過程を記述する熱収支モデルが一般に使われる。本研究で用いたモデルは、鉛直3層の1次元熱収支モデルである(Tsutsui, 2017)。一方AR5DBのシナリオの気候計算に使われた

⁴³ 気候感度の幅を特定する研究は、様々なアプローチで実施されているが、現状では、AR5 時点の気候モデルや放射強制力の情報に依拠している。並行して、新しい気候モデルの開発も進められており、2021~22年に発表予定のIPCC第6

次評価報告書に向けて、新しい気候予測情報が実施される見通しである。ECS、TCR、TCREといった温度上昇を定量化する指標が、AR6でどのように評価されるか注目される。

MAGICCでは、海洋が南北半球別に多層に区切られ、陸域部分との熱交換も考慮されている (Meinshausen et al., 2011)。

両モデルは構造上の違いはあるが、計算結果を左右するのは、熱容量や熱交換などのパラメータの調整である。本研究のモデルでは、AR5時点の多数の複雑な気候モデルの平均的な振舞いを模擬するよう調整している。一方AR5DBの600通りの気候計算に使われたMAGICCのパラメータは、AR4時点の複雑な気候モデルに基づいて調整されている (Meinshausen et al., 2009; Rogelj et al., 2012; Schaeffer et al., 2015)。基になる複雑な気候モデルは本研究の方が新しいが、気候モデルのばらつきについてはAR5時点とAR4時点ではほぼ同等である (Flato et al., 2013)。したがって、本研究で対象とする全球平均の温度については、本研究の手法とMAGICCの中央値で大きな違いはない。2100年の温度上昇の二乗平均平方根誤差は、523本の全シナリオで 0.08°C 、本研究で注目した確率 $>33\%$ で 2°C 未満となる276本のシナリオで 0.1°C である。

本研究で独自モデルを用いるのは、パラメータ設定の詳細も含めて、著者自身はその仕組みを完全に理解していることによる。MAGICCはソースコードが公開されていないため、ブラックボックス的な使い方に限定される面がある。

なお、AR5DBの温度データや、ここで用いた非 CO_2 要因の切り分けが、簡易気候モデルベースであることに注意を要する。実際には、要因切り分けの前提となる加法性、すなわち放射強制力に対する温度応答の重ね合わせは、必ずしも成立しない。また、温度が上昇する状態と下降する状態で、海洋の熱吸収などの特性が変わる可能性がある。これらは、簡易気候モデルの前提(放射強制力に対する線形性)を逸脱する。 2°C 程度の2100年までの気候の推移では、非線形性はそれほど大きくないと見られるが、簡易

気候モデルの限界は常に意識しておく必要がある。

【参考文献】

- 筒井純一(2017) 長期緩和シナリオの温度目標適合性を評価する新しい方法論, 環境情報科学, 46(3):30–34.
- Allen, M.R., D.J. Frame, C. Huntingford, C.D. Jones, J.A. Lowe, M. Meinshausen and N. Meinshausen (2009) Warming caused by cumulative carbon emissions towards the trillionth tonne, *Nature*, 458 (7242):1163–1166.
- Brown, P.T. and K. Caldeira (2017) Greater future global warming inferred from Earth’s recent energy budget, *Nature*, 552: 45–50.
- Calvin, K., L. Clarke, V. Krey, G. Blanford, K. Jiang, M. Kainuma, E. Kriegler, et al. (2012) The role of Asia in mitigating climate change: Results from the Asia modeling exercise, *Energy Economics*, 34:S251–S260.
- Ciais, P., C. Sabine, G. Bala, L. Bopp, V. Brovkin, J. Canadell, A. Chhabra, et al. (2013) Carbon and other biogeochemical cycles, in Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, et al. (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 465–570.
- Clarke, L., K. Jiang, K. Akimoto, M. Babiker, G. Blanford, K. Fisher-Vanden, J.-C. Hourcade, et al. (2014) Assessing transformation pathways, in Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, et al. (Eds.), *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 413–510.
- Collins, M., R. Knutti, J. Arblaster, J.-L. Dufresne, T. Fichefet, P. Friedlingstein, X. Gao, et al. (2013) Long-term climate change: projections, commitments and irreversibility, in Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, et al. (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1029–1136.
- Eyring, V., S. Bony, G.A. Meehl, C. Senior, B. Stevens, R.J. Stouffer and K.E. Taylor (2015) Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organisation, *Geoscientific Model Development Discussions*,

- 8(12):10539–10583.
- Fisher, B.S., N. Nakicenovic, K. Alfsen, J. Corfee Morlot, F. de la Chesnaye, J.-C. Hourcade, K. Jiang, et al. (2007) Issues related to mitigation in the long term context, in Metz, B., O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave and L.A. Meyer (Eds.), *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 169–250.
- Flato, G., J. Marotzke, B. Abiodun, P. Braconnot, S.C. Chou, W. Collins, P. Cox, et al. (2013) Evaluation of climate models, in Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, et al. (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 741–866.
- Fuss, S., J.G. Canadell, G.P. Peters, M. Tavoni, R.M. Andrew, P. Ciais, R.B. Jackson, et al. (2014) Betting on negative emissions, *Nature Climate Change*, 4(10): 850–853.
- Goodwin, P., A. Katavouta, V.M. Roussenov, G.L. Foster, E.J. Rohling and R.G. Williams (2018) Pathways to 1.5 °C and 2 °C warming based on observational and geological constraints, *Nature Geoscience*, 11:102–107.
- IEA (2016a) *World Energy Outlook 2016*, International Energy Agency.
- IEA (2016b) *World Energy Model Documentation 2016 Version*, available at: http://www.worldenergyoutlook.org/media/weoweb-site/2016/WEM_Documentation_WEO2016.pdf (accessed 1 February 2018).
- IEA (2017) *World Energy Outlook 2017*, International Energy Agency.
- IPCC (2014) *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by Core Writing Team, IPCC, Geneva, Switzerland.
- Knutti, R. and J. Rogelj (2015) The legacy of our CO₂ emissions: a clash of scientific facts, politics and ethics, *Climatic Change*, 133(3):361–373.
- Knutti, R., M.A.A. Rugenstein and G.C. Hegerl (2017) Beyond equilibrium climate sensitivity, *Nature Geoscience*, 10:727–736.
- Krey, V., O. Masera, G. Blanford, T. Bruckner, R. Cooke, K. Fisher-Vanden, H. Haberl, et al. (2014) Annex II: Metrics & Methodology, in Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, et al. (Eds.), *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1281–1328.
- Kriegler, E., I. Mouratiadou, G. Luderer, N. Bauer, K. Calvin, E. DeCian, R. Brecha, et al. (2013a) *Roadmaps Towards Sustainable Energy Futures and Climate Protection: A Synthesis of Results from the RoSE Project (1st Edition)*, Potsdam Institute for Climate Impact Research, Potsdam.
- Kriegler, E., K. Riahi, N. Bauer, V.J. Schwanitz, N. Petermann, V. Bosetti, A. Marcucci, et al. (2015) Making or breaking climate targets: The AMPERE study on staged accession scenarios for climate policy, *Technological Forecasting and Social Change*, 90:24–44.
- Kriegler, E., M. Tavoni, T. Aboumahboub, G. Luderer, K. Calvin, G. Demaere, V. Krey, et al. (2013b) What does the 2°C target imply for a global climate agreement in 2020? The LIMITS study on Durban Platform scenarios, *Climate Change Economics*, 04(04):1340008.
- Kriegler, E., J. Weyant, G. Blanford, V. Krey, L. Clarke, J. Edmonds, A. Fawcett, et al. (2014) The role of technology for achieving climate policy objectives: overview of the EMF 27 study on global technology and climate policy strategies, *Climatic Change*, 123(3-4):353–367.
- Matthews, H.D., N.P. Gillett, P.A. Stott and K. Zickfeld (2009) The proportionality of global warming to cumulative carbon emissions, *Nature*, 459(7248), 829–832.
- Meinshausen, M., N. Meinshausen, W. Hare, S.C.B. Raper, K. Frieler, R. Knutti, D.J. Frame, et al. (2009) Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2°C, *Nature*, 458(7242):1158–1162.
- Meinshausen, M., S.C.B. Raper and T.M.L. Wigley (2011) Emulating coupled atmosphere-ocean and carbon cycle models with a simpler model, MAGICC6 – Part 1: Model description and calibration, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(4):1417–1456.
- Moss, R.H., J.A. Edmonds, K.A. Hibbard, M.R. Manning, S.K. Rose, D.P. van Vuuren, T.R. Carter, et al. (2010) The next generation of scenarios for climate change research and assessment, *Nature*, 463(7282):747–56.
- Myhre, G., E.J. Highwood, K.P. Shine and F. Stordal (1998) New estimates of radiative forcing due to well mixed greenhouse gases, *Geophysical Research Letters*, 25(14):2715–2718.
- O’Neill, B.C., C. Tebaldi, D. van Vuuren, V. Eyring, P. Friedlingstein, G. Hurtt, R. Knutti, et al. (2016) The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6, *Geoscientific Model Development*,

9:3461–3482.

- Prather, M.J., C.D. Holmes and J. Hsu (2012) Reactive greenhouse gas scenarios: Systematic exploration of uncertainties and the role of atmospheric chemistry, *Geophysical Research Letters*, 39(9), 10.1029/2012gl051440.
- Riahi, K., F. Dentener, D. Gielen, A. Grubler, J. Jewell, Z. Klimont, V. Krey, et al. (2012) Chapter 17 - Energy Pathways for Sustainable Development, in *Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future*, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA and the International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, pp. 1203–1306.
- Riahi, K., E. Kriegler, N. Johnson, C. Bertram, M. den Elzen, J. Eom, M. Schaeffer, et al. (2015) Locked into Copenhagen pledges — Implications of short-term emission targets for the cost and feasibility of long-term climate goals, *Technological Forecasting and Social Change*, 90(Part A): 8–23.
- Riahi, K., D.P. van Vuuren, E. Kriegler, J. Edmonds, B.C. O’Neill, S. Fujimori, N. Bauer, et al. (2017) The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview, *Global Environmental Change*, 42:153–168.
- Rogelj, J., M. Meinshausen and R. Knutti (2012) Global warming under old and new scenarios using IPCC climate sensitivity range estimates, *Nature Climate Change*, 2(4):248–253.
- Rogelj, J., M. Schaeffer, P. Friedlingstein, N.P. Gillett, D.P. van Vuuren, K. Riahi, M. Allen, et al. (2016) Differences between carbon budget estimates unravelled, *Nature Climate Change*, 6(3):245–252.
- Schaeffer, M., L. Gohar, E. Kriegler, J. Lowe, K. Riahi and D. van Vuuren (2015) Mid- and long-term climate projections for fragmented and delayed-action scenarios, *Technological Forecasting and Social Change*, 90(Part A):257–268.
- Smith, P., S.J. Davis, F. Creutzig, S. Fuss, J. Minx, B. Gabrielle, E. Kato, et al. (2016) Biophysical and economic limits to negative CO₂ emissions, *Nature Climate Change*, 6:42–50.
- Tsutsui, J. (2017) Quantification of temperature response to CO₂ forcing in atmosphere–ocean general circulation models, *Climatic Change*, 140:287–305.
- UNFCCC Secretariat. (2016) *Synthesis Report on the Aggregate Effect of Intended Nationally Determined Contributions*, available at: http://unfccc.int/focus/indc_portal/items/9240.php (accessed 1 February 2018).

筒井純一 (つついじゅんいち)

電力中央研究所 環境科学研究所