

大阪地方裁判所平成30年（行ウ）第184号
環境影響評価書確定通知取消等請求事件

意見書

地球温暖化に関する基本認識について

2020年8月10日

国立環境研究所 江守正多

要旨

地球の気温は産業革命以降、変動を繰り返しつつも長期的に温暖化しており、その主な原因は人間活動による大気中温室効果ガスの増加であることへの理解が進んできた。近年増加する異常気象と地球温暖化の関係についても、科学的な評価が進んでいる。地球温暖化がこのまま進むと人間社会への悪影響が深刻化することが予測されており、「気候危機」という認識が強まってきている。この危機を回避するために、国際社会は「パリ協定」において、2050年にも世界の二酸化炭素排出量を実質ゼロにすることを目指し始めた。その実現のためには、エネルギー技術の変化をはじめ、人々の世界観の変化までを含む、人間社会の大転換が必要である。

1. 地球温暖化とその原因

地球の気温（世界平均気温）は年々不規則に変動するが、産業革命以降、長期的には上昇傾向が顕著であり、現在までに約1°C上昇した（図1）。その主な原因は、人間活動ともなって大気中の温室効果ガスが増加していることにより、地球から宇宙に赤外線が放出されにくくなり、地球システムが全体として持つエネルギーが増加していることと考えられる。

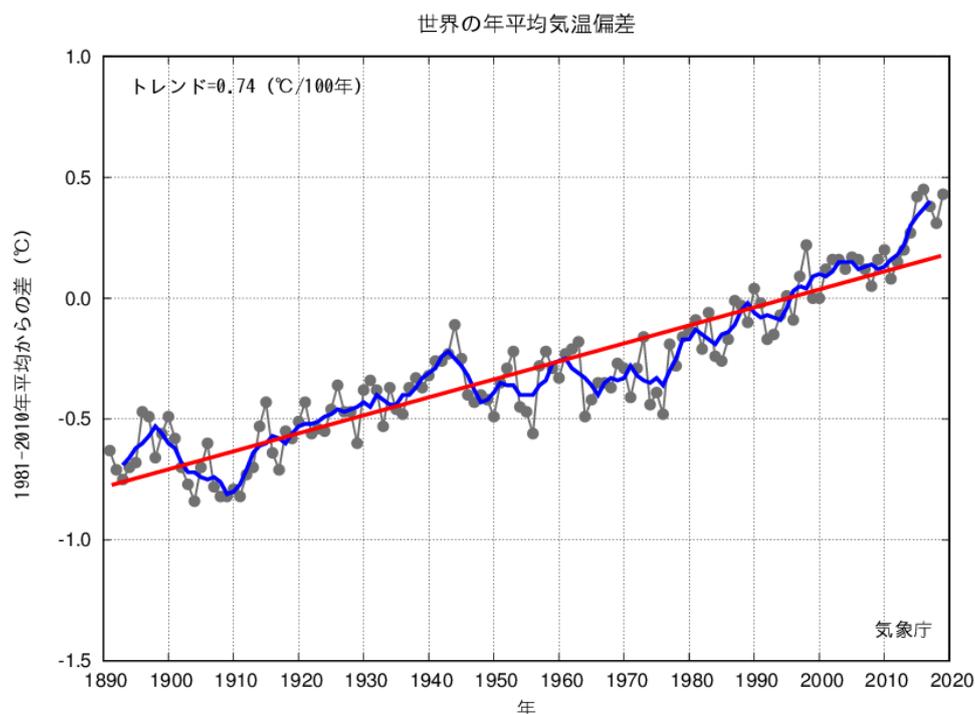


図1 観測された世界平均気温の変化。気象庁ホームページより。

このことは以下のようにして理解されている。一般に、地球の気温が変化する要因は、

1. 内部変動（気候システム内部のメカニズムにより自然に生じる変動）
2. 外部強制（外部条件の変化）に対する気候システムの応答

に分けて考えることができる。2はさらに、

- 2a. 自然の外部強制によるもの
- 2b. 人間活動に起因する外部強制によるもの

に分けられる。1にはたとえばエルニーニョ、ラニーニャなどの変動が含まれる。2aの外部強制は太陽活動の変動と火山噴火が主なものである。2bの外部強制は大気中の温室効果ガスの増加のほか、大気汚染物質などのエアロゾル（大気中の微粒子）の変化、土地利用変化などである。

20世紀後半以降の世界平均気温の変化を、物理法則に基づく気候モデルによってシミュレーションすると、この各要因の大きさを見積もることができる。その結果は、1. 内部変動が $-0.1\sim 0.1^{\circ}\text{C}$ 、2a. 自然の外部強制への応答が $-0.1\sim 0.1^{\circ}\text{C}$ 、2b. 人間活動による外部強制への応答が $0.6\sim 0.8^{\circ}\text{C}$ となった（IPCC, 2013; 図2）。これらを合わせると、観測された気温上昇とほぼ整合する。また、2bのうち、温室効果ガスのみによる効果は 0.9°C 前後と見積もられ、これを -0.2°C 前後のエアロゾル等による効果が打ち消している。これらは、世界の多数の研究グループが独立に行ったシミュレーションの結果をまとめたものである。このように、近年の地球温暖化の主な原因が人間活動、とりわけ温室効果ガスの増加であることは、科学的によく理解されている。

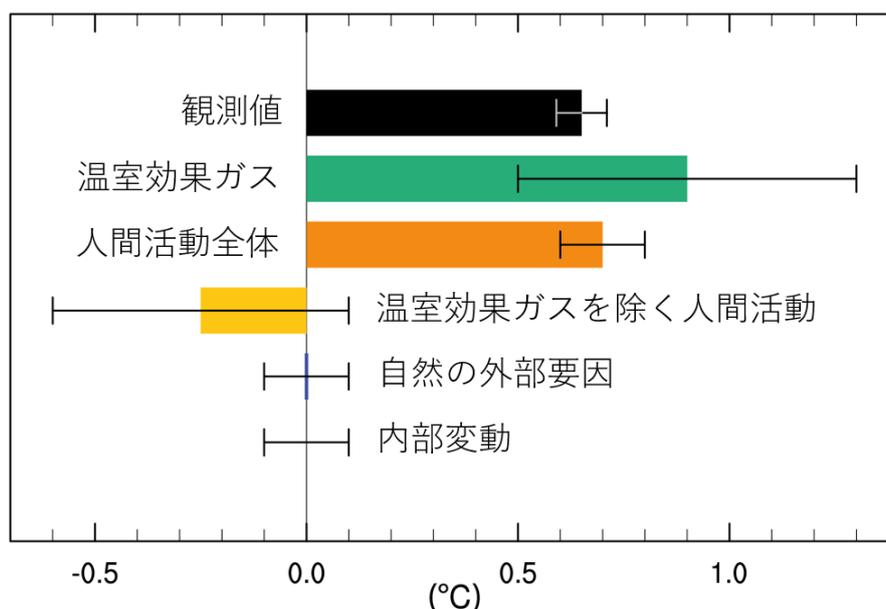


図2 世界平均気温上昇量（1951-2010年）の要因分析。IPCC（2013）Figure 10.5より。

2. 二酸化炭素の収支と濃度増加

人間活動により増加している温室効果ガスのうち、最も全体の効果が大きいのは二酸化炭素(CO₂)である(そのほかにメタン、一酸化二窒素などがある)。CO₂は、化石燃料(石炭、石油、天然ガス)の燃焼によるエネルギー生成や工業過程で約85%が、残りが森林伐採などの土地利用変化によって、排出されている。こうして人間活動により排出されるCO₂のうち、約半分は陸上の生態系と海洋により吸収され、残りが大気中の濃度を増加させる(Global Carbon Project, 2019; 図3)。

大気中のCO₂濃度は年間2~3 ppmのペースで増え続けており、現在は約410 ppmまで達した。南極氷床コア(氷に閉じ込められた過去の空気)のデータによれば、過去数10万年の間に、約10万年の周期で生じていた地球の氷期と間氷期の変動において、氷期のCO₂濃度は約180 ppm、間氷期(産業革命前)は約280 ppmであった。近現代の人間活動によりわずか200年程度の間生じたCO₂濃度の増加(130 ppm)が、氷期と間氷期の変動幅(100 ppm)を既に優に超えていることは、地球史の観点から見ても大きな事件といえる。

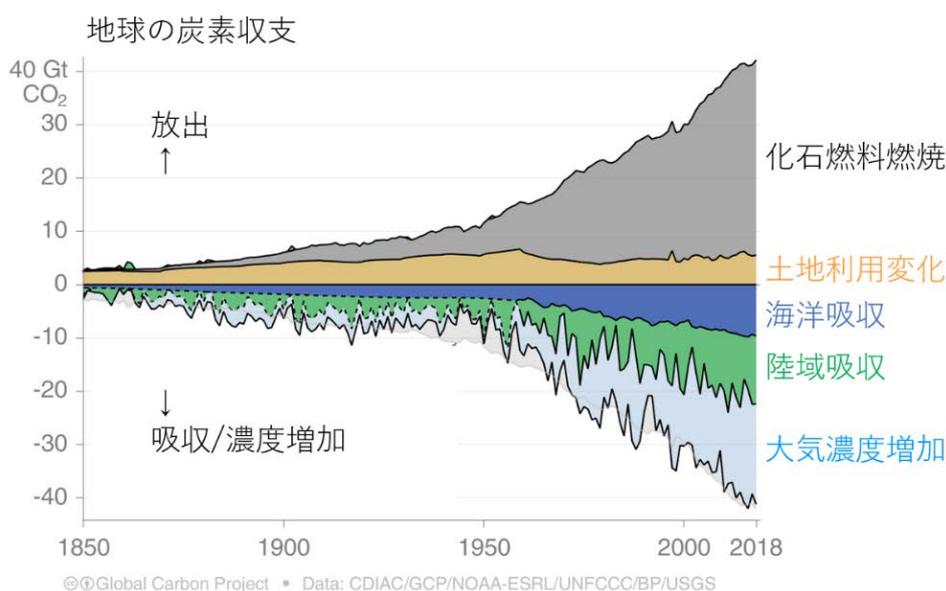


図3 地球の炭素収支。Global Carbon Project (2019)より。

3. よくある疑問への回答

気候変動の科学に関して様々な疑問が呈されることがある。これらの疑問は気候変動の科学の帰結に反発する勢力により意図的に流布されている場合があるため(オレスケス・コンウェイ, 2011)、注意を要する。いくつかの典型的な疑問とそれらへの回答を示す。

3.1. 気温が上昇しているのは都市化の影響では？

都市において、人口排熱、緑地の減少、アスファルトやコンクリートの蓄熱といった原因で気温が上昇しているのは確かである（いわゆるヒートアイランド現象）。しかし、気温上昇は海上でも都市以外の陸上でも地球上のほとんどの地域で観測されており、世界平均すると都市化の効果は非常に小さい。

3.2. 地球は温暖化と寒冷化のサイクルを繰り返しているのでは？

地球は約 10 万年ごとに寒冷な「氷期」と温暖な「間氷期」を過去何回か繰り返しており、現在は間氷期である。この原因は地球の公転軌道や自転軸が天文学的に変動することである。天文学の予測によれば、次の氷期が訪れるとすれば約 5 万年先なので、それまでは人間活動による温暖化に逆行して氷期が訪れることはないと考えられる。

3.3. 太陽活動が弱まってきているので寒冷化するのでは？

太陽活動は 1980 年代から弱まってきているが、それにもかかわらず世界平均気温は上昇している。また、17 世紀ごろに太陽の不活発期（マウンダー極小期）があったが、その影響は世界平均では 0.3°C 程度の寒冷化と考えられている。今世紀中に太陽が再び本格的な不活発期に入ったとしても、その影響は人間活動による温暖化に逆行して寒冷化を起こすほどではないと考えられる。

3.4. 地球温暖化は止まったのでは？

1998 年から 2013 年まで世界平均気温の上昇傾向が見られない時期があり、地球温暖化は止まった、気温上昇の予測は間違っていたという主張が見られた。しかし、2014 年から 16 年にかけて再び世界平均気温は大きく上昇した。気温上昇には不規則な自然変動が重なっているため、長期的な温暖化傾向が続いていても、時期によっては気温上昇がみられなくなることは不思議ではない。気温上昇の停滞期には、熱が海洋の深層に運ばれていて、地表付近の温度に表れにくかったことがわかっている。

3.5. CO₂ は大気の 0.04% しかないのだから、影響は小さいのでは？

大気の主成分は窒素と酸素であるが、窒素と酸素は赤外線を吸収・放出しない。赤外線の吸収・放出により地表付近の温度を保つ役割を果たしているのは、大気中に微量に存在している水蒸気や CO₂ などの温室効果ガスである。もしも地球に温室効果がなければ、地表付近の平均気温は -19°C 程度になると考えられる。これを 14°C 程度に保っているのは窒素や酸素ではなく、微量な温室効果ガスなのであるから、温室効果ガスが少し増えれば、気温に大きな影響を与えるのである。

3.6. 水蒸気の方が CO₂ より重要な温室効果ガスなのでは？

現在の地球の気温を保つうえで最も大きな役割を果たしている温室効果ガスは水蒸気である。しかし、人間活動による排出により直接的に大気中濃度が増加している温室効果ガスの中で最も重要なのはCO₂である。大気中の水蒸気量は主に気温で決まるため、人間活動による水蒸気の排出により水蒸気が増えるわけではない。CO₂の増加により気温が上がれば、その結果として水蒸気が増えてさらに気温が上がる。それを抑制するためには、水蒸気の排出ではなく、CO₂の排出を減らすことが必要なのである。

3.7. 気温が原因でCO₂は結果では？

数年ごとの自然変動では、気温が先に変化し、CO₂濃度がそれに追従する。これは、エルニーニョなどの自然変動で気温が変化すると、陸上の生態系が応答して（気温上昇→呼吸が増える、光合成が減る、森林火災が増えるなど）、CO₂濃度が変化するためである。このことは人間活動によるCO₂増加が気温上昇をもたらすことと矛盾しない。自然界には、「気温上昇→CO₂増加」と、「CO₂増加→気温上昇」の両方の仕組みがあり、どちらか一方ではない。

3.8. シミュレーションによる予測は不確かなのでは？

気候モデルによるシミュレーションは、基本的に物理法則に基づくとはいえ、細部には半経験的な仮定を含むため、結果には不確かさがある。しかし、気候モデルの不確かさは、過去の観測データにより制約することができ、過去のデータに整合しない非現実的なモデル結果は除外することができる。約2万年前の最終氷期の寒冷化の大きさも、将来予測の制約に使うことができる。こうして制約をかけていくと、気温上昇の予測幅を絞り込むことができる。最新の論文によれば、大気中CO₂濃度を倍にして十分時間が経ったときの世界平均気温上昇量は2.6-3.9°Cの可能性が高い（Sherwood *et al.*, 2020）。

3.9. IPCCは温暖化人為説、脅威説を唱える科学者の集まりなのでは？

国連のIPCC（気候変動に関する政府間パネル）は、気候変動およびその対策の科学的、技術的、社会経済学的な評価を行う組織である。IPCC自体は研究を行わず、学術誌に発表された研究論文等に基づき評価を行う。評価報告書の草稿のレビューは3回行われ、専門家レビューには専門家なら誰でも参加して草稿にコメントできる。すべてのコメントに対する執筆者の応答が義務付けられており、報告書公表後にコメントと応答もすべて公開される。報告書は各国政府の承認を経て公表される。このようにIPCCは可能な限り厳格で透明性の高い過程を経て評価報告書を作成しており、一部の科学者グループの説に基づく偏った内容になることは非常に考えにくい。

4. 異常気象の増加と地球温暖化の関係

日本では2018年の西日本豪雨、災害級とよばれた熱波、関西国際空港が高潮で浸水した

台風 21 号、2019 年には千葉県の大停電を引き起こした台風 15 号、引き続き東日本各地で浸水をもたらした台風 19 号と、記録的な気象災害が相次いでいる。同様の被害は世界各地でみられる。

一般に、(ある地域、季節において) 30 年に一度よりも稀に生じるような極端な気象を異常気象とよぶ。日々の気象も年々の天候も常に不規則に内部変動しているため、異常気象はいわば自然現象であり、昔から稀に生じてきた。しかし、地球温暖化の平均的な気温上昇により、より極端な高温が生じやすくなり、また、気温上昇にともなう大気中の水蒸気量の増加により、より極端な大雨が生じやすくなっていると考えられる。さらに、内部変動の特徴(例えばジェット気流の蛇行の起きやすさ)自体も、地球温暖化により変調していくと考えられる。

近年、イベント・アトリビューションとよばれる手法により、このことを調査する研究が進んでいる。地球温暖化(人間活動による外部強制)が仮に無かったとした場合の仮想的な地球のシミュレーションと、地球温暖化が生じている現実的なシミュレーションを、それぞれ多数回繰り返す。注目する異常気象が発生する頻度を両者の間で比較すると、その異常気象が、地球温暖化によって何倍起きやすくなっているかなどを評価することができる。この手法により、例えば 2018 年の日本の熱波は、地球温暖化がなければほぼ起き得なかったレベルであると評価されている (Imada *et al.*, 2019; 図 4)。

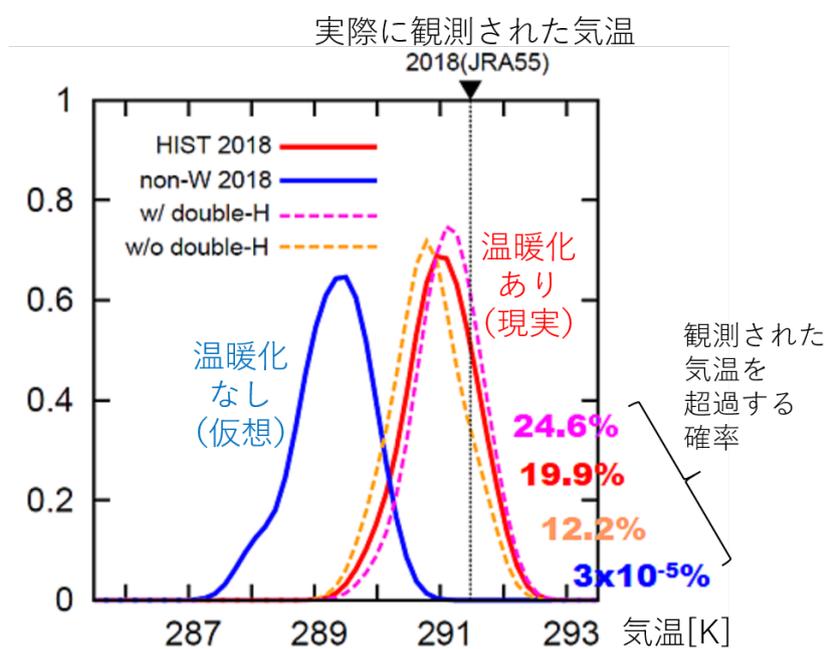


図 4 2018 年 7 月の日本域 (上空 850 hPa) の気温の確率密度分布。横軸は気温 (絶対温度)。仮想的に人間活動による温暖化が無かったとした場合 (青) と現実に人間活動による温暖化が起きている場合 (赤)。破線は太平洋高気圧とチベット高気圧の「2 重高気圧」の構造がある場合 (マゼンタ) と無い場合 (オレンジ)。縦の点線が実際に観測された 2018 年 7 月の気温。Imada *et al.* (2019) より。

降水量については自然変動が大きいため、同様の方法で人間活動の影響を特定することは難しい。しかし、地球温暖化が無かった仮想的な場合と、地球温暖化が生じている現実との双方において、もしも同じ気圧、風のパターン（低気圧や前線）が生じたとすると、温暖化している方が、水蒸気が多い分だけ降水量が多くなることは理論的に明らかである。台風については、水蒸気が多い方が勢力も強まることが明らかである。この意味において、2017年の九州北部豪雨、2018年の西日本豪雨、台風21号、2019年の台風15号、19号、そして今年2020年の梅雨前線により各地でもたらされた豪雨を含む、近年の豪雨災害の背景には地球温暖化が一因としてあると考えて間違いない。

5. 将来の気候の変化とリスクの見通し

今後、もしも世界が化石燃料に依存したまま発展を続け、温室効果ガスの排出量が今後も増え続けるとすると、世界平均気温は今世紀末までに4°C程度上昇すると予測されている（IPCC, 2013）。気温上昇の大きさは地域によって異なり、北半球の陸上、とくに高緯度域では6~8°Cまで増幅される。降水量が多い地域では水蒸気の増加によりさらに降水量が増え、乾燥地域では逆にさらに乾燥化が進むところが生じる。グリーンランドと南極の氷床、極域や山岳の氷河が減少し、海水の熱膨張の効果と合わせて、海面が今世紀末までに最大1m程度上昇する。極端な熱波、大雨、強い台風やハリケーン、高潮、地域によっては干ばつが今後も増加すると予測される。これらによって、人間の健康、食料、水、社会基盤、そして生態系への悪影響が深刻化することが懸念されている。

日本においても、前述した近年の豪雨災害や熱波に代表されるような悪影響が長期的に増加し、深刻化する。ドイツのシンクタンク「ジャーマンウォッチ」によれば、日本は2018年に最も深刻な気候変動被害を受けた国の一つである（German Watch, 2019）。

世界に目を向けると、気候変動の悪影響は、大きな気温上昇と環境変化が生じる北極域、干ばつが増える乾燥域、海面上昇により高潮や浸水が増える沿岸の低平地や小さい島国で、とくに深刻と考えられる（IPCC, 2014）。これらの地域に住む発展途上国の人々や先住民は、対応力も限られるために深刻な被害を受けるが、彼らは先進国の人々と比較して地球温暖化の原因となる温室効果ガスをほとんど排出していない。つまり、原因に最も責任がない人々が最も深刻な被害を受けるという不正義な構造がある。同様に、過去の世代の排出の結果として生じる地球温暖化の悪影響を将来世代が被るという世代間の不正義も存在する。

また、気温上昇がある臨界点を超えると、不可逆で不連続な変化が生じる「ティッピング」とよばれる現象の存在が予測されている（Lenton *et al.*, 2019）。例えば、グリーンランドの氷床は既に解け始めているが、気温上昇がさらに進んで臨界点を超えると、気温がそれ以上上昇しなくても氷が自動的に融け続ける状態に入ると考えられる。他にも、南極の氷床の流出、アマゾンの熱帯雨林の枯死などが、このようなティッピングの性質を持つと

考えられている。これらが生じる臨界点の温度が何度であるかは正確にはわかっていないが、気温が上昇するほど臨界点を越える可能性が高まるといえる。さらに、これらのティッピング現象が連鎖することにより、最初の臨界点を越えると、数百年以上かけて気温が4°C程度まで上昇することが止められなくなる可能性も指摘されている (Steffen *et al.*, 2018)。

世界平均気温が産業革命前と比べて1.5°Cおよび2°C上昇した影響を詳細に評価したIPCCの「1.5°Cの地球温暖化に関する特別報告書」(IPCC, 2018)によれば、

- 気候関連のリスクと貧困に直面する人口を1.5°Cでは2°Cよりも2050年時点で数億人低く抑えることができる。
- 世界平均海面上昇を1.5°Cでは2°Cよりも2100年時点で10cm程度低く抑えることができ、そのリスクに直面する人口を最大1千万人程度低く抑えることができる。
- 温水域のサンゴ礁は1.5°Cで今よりさらに70~90%が失われ、2°Cでは99%が失われる。などが示されており、後述するパリ協定の長期目標において、2°Cではなく1.5°Cを目指すべきという国際社会の認識が強まっている。

このような理解に基づき、気候変動のリスクは人間社会にとっての深刻な脅威であるという認識が高まり、「気候危機」といわれるようになってきている。

6. 地球温暖化を止める

国際社会は1992年に国連気候変動枠組条約を採択し、1997年には京都議定書で先進国の排出削減義務を取り決めるなど、世界で協力して温室効果ガスの増加を抑制すること(地球温暖化の「緩和」)に取り組んできた。2015年にはパリ協定が採択され、すべての国が温室効果ガスの増加抑制に参加するルールができた。

パリ協定では長期目標として、世界平均気温の上昇を、産業革命前を基準に2°Cより十分低く保ち、さらに1.5°C未満に抑えることを目指して努力を追求することが合意されている。このために、21世紀後半に人間活動による世界の温室効果ガス排出量を実質ゼロ(排出量と吸収量がバランスする)まで削減することが必要であるという認識がパリ協定に明示されている。さらに、IPCCの「1.5°Cの地球温暖化に関する特別報告書」では、現在のペースでは2040年前後に1.5°Cに到達してしまうこと、地球温暖化を1.5°Cに抑えるには2050年前後にも人間活動による世界のCO₂排出量を実質ゼロにし、他の温室効果ガス(メタン等)も大幅に削減する必要があることが示された(IPCC, 2018)。

人間活動によるCO₂排出量が実質ゼロまで減らせたとき、自然(陸域生態系と海洋)の吸収は続いているため、差し引きで大気中のCO₂濃度は減少し、気温を下げるように作用する。一方、海洋の熱容量による熱慣性と他の温室効果ガスの増加により、気温を上げる作用が続くため、両者がほぼ打ち消しあって、気温上昇が止まる。これが、パリ協定の長期目標が目指している気候システムの状態である。CO₂排出が実質ゼロになるのが早ければ早いほど、低い温度で気温上昇を止めることができる。

2019年時点で、各国が約束している2030年までの削減目標をすべて達成できたとしても、世界平均気温が3°C以上上昇する削減ペースであり、長期目標と整合的なペースにはまったく足りていないことがわかっている（UNEP, 2019）。パリ協定では、5年に一度、世界全体で進捗を確認して各国目標の再設定を行う「グローバル・ストックテイク」という仕組みが組み込まれており、これによって各国目標の合計と長期目標との間のギャップを埋めていくことが意図されている。しかし、現時点では埋めるべきギャップは極めて大きい。

最近の分析によれば、世界に既に存在するCO₂排出インフラ（火力発電所や内燃機関自動車等）を、従来と同様の寿命と稼働率で使用すると、それだけで1.5°Cの温暖化を超えてしまう可能性が高い（Tong *et al.*, 2019）。したがって、気温上昇1.5°C未満の目標を目指すためには、既存のインフラを従来の寿命よりも早くリタイアさせるか、稼働率を下げるか、CCS（CO₂を吸収して地中に封じ込める技術）を使うかのいずれかを行う必要がある。当然、CO₂排出インフラをこれから新設することは極めて望ましくない。

特に石炭火力は、効率がよいものでも発電電力量あたりのCO₂排出量がガス火力の2倍程度である（ライフサイクル排出量で、超々臨界石炭火力が881 g-CO₂/kWhに対して、LNG複合火力が430 g-CO₂/kWh；電力中央研究所, 2016）ため、とりわけ早期の削減が必要と考えられている。気温上昇1.5°C未満を目指すシナリオでは、石炭火力が世界の一次エネルギーに占める割合が、2010年と比較して2030年には6~8割減少する必要があり、2050年には（CO₂回収貯留設備が付いていない限り）ほぼゼロになる必要がある（IPCC, 2018）。

7. 社会の大転換が必要とされている

人間社会はこの気候危機にどう向き合っていくべきだろうか。主に発展途上国の人口増加や工業化によって、世界のエネルギー需要は増加し続けている。これを賄うため、化石燃料の消費は未だ増加しているのが現状である。太陽光発電、風力発電、電気自動車、蓄電池等のクリーンエネルギー技術は急速にコストが低下しており、大量導入が図られているが、残念ながらエネルギー需要の増加に追い付いていない。今後はさらにクリーンエネルギー技術の導入を加速し、増加するエネルギー需要を賄いつつ、既存のエネルギー設備を置き換えていかねばならない。これは単に技術的な課題であるのみならず、そのための制度の変化、産業の変化等を伴う社会の大転換を意味する。同様の転換が食料生産や都市などのシステムにおいても必要となる。

私見として付け加えるならば、この大転換には人々の世界観の変化が伴うだろう。つまり、これまではエネルギーを作る際にCO₂が出るのは仕方がないというのが常識であったが、将来はエネルギーを作る際にCO₂を出すのは当然許されないという常識が変わる。また、現在は気候変動により発展途上国や将来世代の人々が不公平な被害にあうことを深刻な問題だと考える人は少ないが、将来はこれが人権問題として当然のように問題視されるだろう。ちょうど、過去の社会において常識であった植民地主義や奴隷制が現在からみると深刻な人権問題であるのと同様である。

このような大転換が起ころうとすれば、それまでの世界観との間で当然ながら摩擦が生じる。そのような摩擦をうまく解消しつつ、多様な価値観を持った多様な立場の人々の合意を得ながら、速やかにこの大転換を進めることが、現在の人間社会に課せられた大きな課題である。

(本稿は『地球・惑星・生命』(東大出版会)の拙稿を基に大幅に加筆修正を行った)

—文献—

IPCC (2013) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, Cambridge University Press.

Global Carbon Project (2019) Global Carbon Budget 2019,

<https://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/19/presentation.htm>

オレスケス, N.・コンウェイ, E.N. (2011) 世界を騙しつづける科学者たち (上・下). 楽工社, 東京, 313pp (上), 327pp (下).

Sherwood, S, *et al.* (2020) An assessment of Earth's climate sensitivity using multiple lines of evidence. *Rev. Geophys.*, DOI: 10.1029/2019RG000678

Imada, Y, *et al.* (2019) The July 2018 high temperature event in Japan could not have happened without human-induced global warming. *SOLA*, **15A**, 8-12.

German Watch (2019) Global Climate Risk Index 2020. <https://germanwatch.org/en/17307>

IPCC (2014) *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability*, Cambridge University Press.

Lenton, T. M, *et al.* (2019) Climate tipping points — too risky to bet against. *Nature*, 575, 592-595.

Steffen, W. *et al.* (2018) Trajectories of the Earth System in the Anthropocene. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **115**, 8252-8259.

IPCC (2018) *An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5 ° C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*, Cambridge University Press.

UNEP (2019) *Emission Gap report 2019*, UNEP.

Tong, D, *et al.* (2019) Committed emissions from existing energy infrastructure jeopardize 1.5°C climate target, *Nature*, 572, 373–377.

電力中央研究所 (2016) 日本における発電技術のライフサイクル CO₂ 排出量総合評価, 電力中央研究所総合報告 Y06

略歴及び著書

1970年神奈川県生まれ。1997年に東京大学大学院 総合文化研究科 博士課程にて博士号（学術）を取得後、国立環境研究所に入所。地球環境研究センター 気候変動リスク評価研究室長等を経て、2018年より地球環境研究センター 副センター長。社会対話・協働推進オフィス代表。専門は地球温暖化の将来予測とリスク論。IPCC（気候変動に関する政府間パネル）第5次および第6次評価報告書 主執筆者。著書に「異常気象と人類の選択」「地球温暖化の予測は『正しい』か？」、共著書に「地球温暖化はどれくらい『怖い』か？」「温暖化論のホンネ」等。