

## 意見書（２）

IPCC 第 6 次評価報告書により更新された気候変動の科学的理解

2021年11月8日

国立環境研究所 江守正多

## 要旨

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）が8月に第6次評価報告書を公表し、気候変動の科学的理解が更新された。人間活動が地球温暖化の主な原因であることは、これまで「可能性が極めて高い」などの不確かさの表現を伴っていたが、今回は「疑う余地がない」と断定された。気温上昇の将来予測の不確かさの幅は長年狭まらなかったが、今回は複数の証拠を総合的に評価することにより、一気に幅が半分になる精度向上が見られた。地球温暖化の進行に伴い、猛暑や大雨などの極端現象が増加し、激甚化することについても理解が深まった。将来の気温上昇は、2021–40年の平均で産業革命前から+1.5°Cに達するのを確実に避けるのは困難になってきた。現状の世界の対策ペースでは、2050年ごろに+2°Cを超え、今世紀末には2.7°C程度の気温上昇が見込まれる。+1.5°Cまでに67%の可能性で留まるためには、人間活動による今後の排出量の累積を400GtCO<sub>2</sub>程度に抑える必要があり、これは現在の世界の排出量の10年分に過ぎない。+1.5°Cを超えて温暖化が進行すれば、南極氷床の崩壊やアマゾン熱帯雨林の枯死などの「可能性は低いが大規模な被害をもたらす」現象の引き金を引いてしまう可能性が徐々に高まる。気候変動の問題において人類が追い詰められている状況が、最新の科学により明確に描き出されたといえる。

### 1. 人間活動の影響による地球温暖化を断定

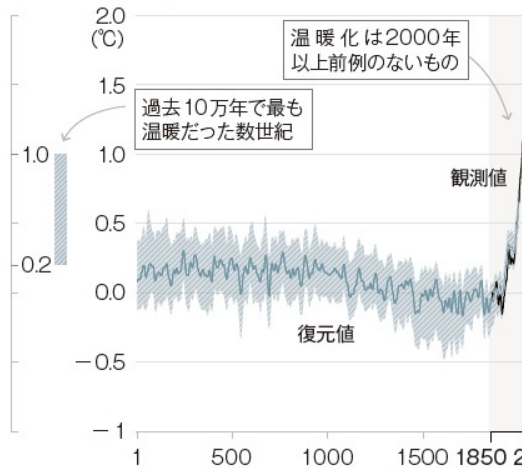
気候変動に関する政府間パネル（IPCC）が8月に公表した第6次評価報告書（IPCC, 2021）は、「人間の影響が大気、海洋及び陸域を温暖化させてきたことには疑う余地がない(unequivocal)」と断定した。シミュレーションの不確かさや自然変動があるため、これまでの2001年の第3次評価報告書では「人間活動が主な原因である可能性が高い(66%以上)」、07年の第4次では「可能性が非常に高い(90%以上)」、13年の第5次では「可能性が極めて高い(95%以上)」と、統計学的にみて「人間活動が主な原因とまではいえない可能性」が少し残っていたが、今回は複数の証拠を総合的に評価して、断定的な結論を導いた。

人間活動による主な影響は、温室効果ガスの増加により赤外線が宇宙に逃げにくくなり地球を暖める効果から、大気汚染物質（エアロゾル）の増加により地表に到達する日射が減り地球を冷やす効果を差し引いたものである。これによって地球が余分に受け取るエネルギーが、気温の上昇のみならず、海洋の温度上昇、氷床の減少などと辻褓が合うことが、より明瞭に説明できるようになった。産業革命前の気温に近いと考えられる1850–1900年と比較して、2010–2019年の地球の気温上昇は、観測された実際の上昇が1.06°Cに対し、人間活動の寄与は1.07°Cと評価されており、誤差の範囲内で100%が人間活動の影響といえる。自然起源の太陽活動変動や火山噴火の寄与は長期的にはほぼゼロである（図1右）。

もう一つの重要な証拠は、近年の気温上昇が過去数千年にわたって前例のないものであることが明瞭になった点だ。例えば1000年前ごろには「中世の温暖期」があって、太陽活動の影響などで地球の気温は変動を繰り返しており、近年の温暖化もそれと同程度だとする、根強い懐疑論があった。しかし、木の年輪や珊瑚の骨格などから過去の気温を推定する古気候復元研究が精緻化された結果、中世の温暖期は地球規模の温暖期ではないことなどが分かった（図1左）。

## 1850～1900年を基準とした世界平均気温の変化

### 世界平均気温(10年平均)の変化



### 世界平均気温(年平均)の変化

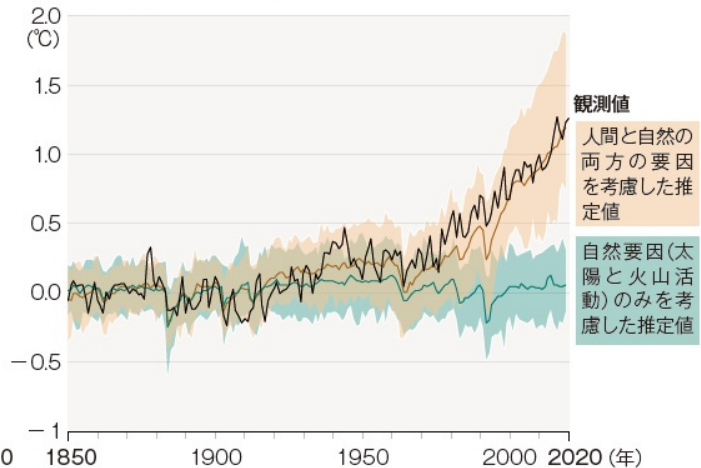


図1 左のグラフは過去2000年間の世界平均気温(10年平均)の変化。灰色の実線は古気候学により復元された値で、1850～1900年を基準とした変化。黒の実線は直接観測された全球表面温度の変化(1850～2020年)。右のグラフは1850年から現在までの世界平均気温(年平均)の変化。黒の実線は観測値。人間と自然の両方の要因を考慮した推定値(茶色)と、自然要因(太陽と火山活動)のみを考慮した推定値(緑色)と比較した。IPCC AR6 WG1 Figure SPM.1より。

## 2. 気温上昇予測の精度向上

将来の気温上昇の予測精度も今回は格段に高まった。地球の気温の上がりやすさを表す基本的な指標として、仮に大気中の二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)濃度を倍増させて(熱容量が大きい海の温度上昇が完了するまで)十分時間が経ったときに、地球の平均気温が何℃上がるかを表す「平衡気候感度」(Equilibrium Climate Sensitivity; ECS)がある。今回の報告書では、ECSの推定を「2.5℃から4℃の可能性が高く(66%以上の可能性)、最良の推定値は3℃」と結論した。

ECSの推定は、40年以上前から試みられているが、「1.5℃から4.5℃の間である可能性が高い」といわれたまま、いくら研究が進んでもその推定幅がほとんど狭まらなかった(図2)。温暖化を増幅する効果も抑制する効果も持つ「雲」の変化の理解が難しかったり、異なる方法で見積もられたECSが異なる範囲を示したりしたためだ。それが今回は、これまで3℃あった幅(1.5-4.5)を一気に半分の1.5℃(2.5-4)まで狭めることに成功した。

ここでも複数の証拠に基づく総合的な評価が注意深く行われた。雲などの物理プロセスの理解、近年の気温上昇に基づく推定、古気候(約2万年前の最終氷期など)の証拠からの推定、といった結果を組み合わせ、可能性の高い範囲を絞り込んだ。「シミュレーションモデルが不確かなので地球温暖化の予測は信用できない」という批判があるが、今回はモデルの結果をそのまま使用してはいない。

ECSの推定精度が上がったことは、政策的に重要な意味を持っている。これまでは「もしもECSが1.5℃だったらあまり温暖化しないのだから、無理して排出削減をしても無駄になるリスクがあるのではないか」という論理で、対策を遅らせるような主張が可能であった。しかし、ECSの推定幅の下限が引き上げられたことで、そのような主張の説得力はさらに失われた。

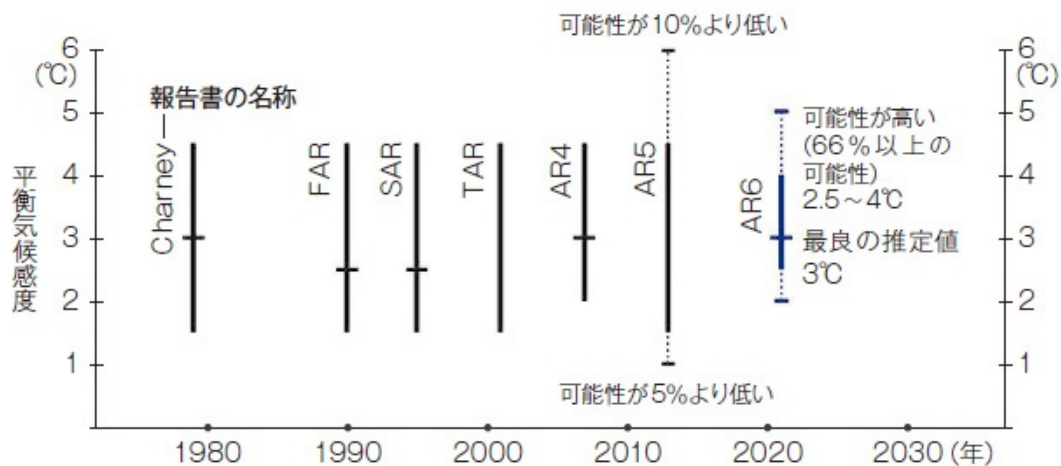


図2 平衡気候感度（ECS）は、地球の気温の上がりやすさを表す基本的な指標。AR6では、様々な研究成果を組み合わせることで、ECSの推定を「2.5°Cから4°Cの可能性が高く（66%以上の可能性）、最良の推定値は3°C」と結論した。IPCC AR6 WG1 Figure TS.16より。

### 3. 極端現象の増加

近年、世界各地で深刻化の認識が高まっている熱波、大雨、干ばつ、森林火災、強い台風などの極端現象（extreme events）についても、人間活動の影響がより明確になった（日本で「異常気象」とよぶのは30年に1度よりも稀なものという定義があるが、「極端現象」は頻度を指定せずに稀に起きる極端な事象を指す）。

熱波は高気圧が停滞したときに起きやすく、大雨は強い低気圧や前線の通過や停滞に伴って起きるなど、極端現象は特定の気圧パターンに伴って起き、その発生は非常に不規則である。しかし、近年はそこに地球温暖化の長期的傾向が重なっている。すると、熱波の気圧パターンが生じた時、近年は平均的な気温上昇分だけ昔よりも余計に高温になるし、大雨の気圧パターンが生じれば、気温上昇により大気中の水蒸気量が増えている分だけ余計に雨が降る。これが、温暖化により極端現象の頻度と強度が増す基本的な理由である。なお、気圧パターンの生じ方自体も温暖化により変調すると考えられるが、これはまだはっきりしない部分が多い。

過去の観測データによれば、極端な高温は世界のほとんどの地域で増加しており、人間活動が寄与していることの確信度が高い。大雨についても多くの地域で増加しており、人間活動が寄与している可能性が高いとしている。

個々のイベントで見ても、仮に人間活動による温暖化が無かった場合と現実に温暖化がある場合のシミュレーションを多数回行って比較する「イベント・アトリビューション」の研究が進んだ。例えば2018年に日本を襲った西日本豪雨のような大雨は、温暖化によって約3倍起きやすくなっており、引き続き起こった同年の猛暑は、温暖化が無ければほとんど起こり得なかったレベルの暑さと評価された。同様な事例が世界中から報告されている。

将来のさらなる温暖化の進行に伴って、極端現象の頻度と強度がさらに増す。これは上述した理由を理解していただければ、明らかなことだろう。例えば、産業革命前に50年に1度しか起きなかったレベルの極端な高温は、現時点（地球の平均気温が約1°C上昇）で既に4.8倍の頻度で起きるようになっている。これが、平均気温上昇が1.5°Cになると8.6倍、2°Cになると13.9倍と増加していく。さらに、もしも平均気温が4°C上昇すると39.2倍と予測されており、ほぼ毎年のように起きることになる（図3）。

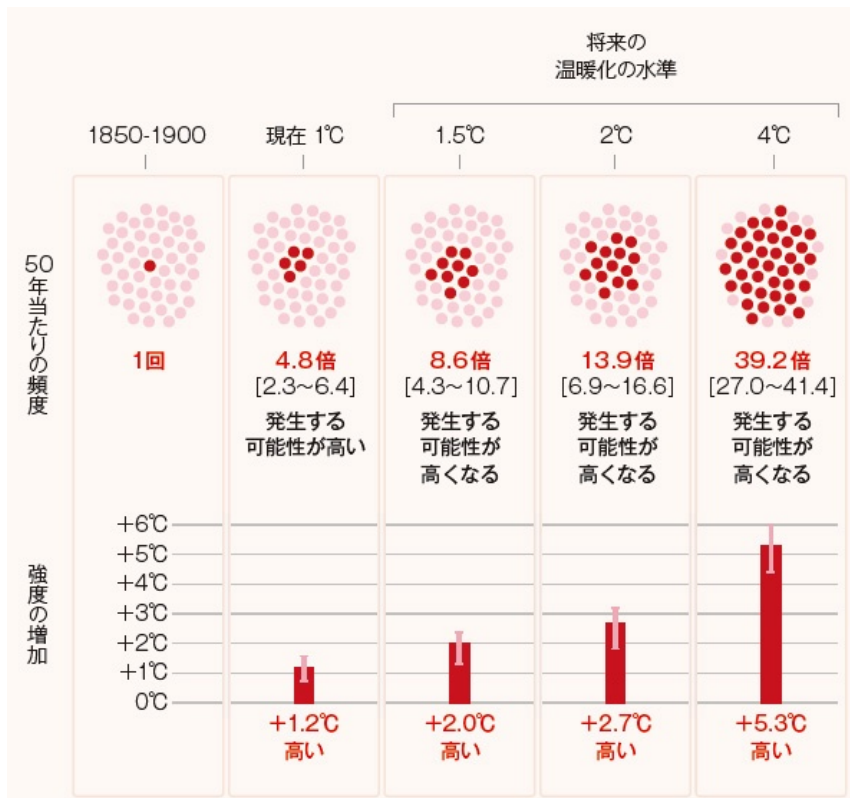


図3 温暖化の進行に伴って、極端現象の頻度と強度がさらに増す。産業革命前に50年に1度しか起きなかつたレベルの極端な高温は、現時点でも4.8倍の頻度で起きる。平均気温が4°C上昇したとすると頻度は39.2倍となり、ほぼ毎年のように起きる。IPCC AR6 WG1 Figure SPM.6より。

#### 4. シナリオに沿った気温上昇の将来見通し

IPCC 第6次評価報告書では、将来の気候変動の見通しを5つのシナリオに基づいて評価している(図4)。共通社会経済経路(Shared Socio-economic Pathways; SSP)とよばれる今回のシナリオ群は、前回第5次報告書で用いられた代表濃度経路(Representative Concentration Pathways; RCP)に比べて、社会経済の将来見通しのバリエーションが組み合わされたものである。SSPに続く数字は社会経済経路の番号、その後のハイフンに続く数字はRCPと同様に2100年におけるおおよその「放射強制力」(W/m<sup>2</sup>)、つまり温暖化を引き起こす強さを表す。

排出量のレベルに関していえば、SSPの使い方はRCPのときと同様である。「非常に低い」排出レベルのSSP1-1.9は、今世紀半ばに世界のCO<sub>2</sub>排出量が実質ゼロ、その後マイナスになり、パリ協定の「1.5°C」目標(産業革命前を基準に+1.5°C)に対応する。「低い」排出レベルのSSP1-2.6は、2070年代にCO<sub>2</sub>排出量が実質ゼロになり、「2°C」目標に対応する。「中間」のSSP2-4.5は、今世紀末までCO<sub>2</sub>排出量が実質ゼロにできず、+2°C以上温暖化する。「高い」SSP3-7.0は今世紀にわたって排出量が増え続け、+4°C近く温暖化する。「非常に高い」SSP5-8.5はさらに温暖化が進む「最悪シナリオ」である(図5)。

社会経済の部分に関しては、「非常に低い」と「低い」シナリオで採用されているSSP1は「持続可能性」を重視した世界、「中間」シナリオのSSP2は社会経済も「中庸な」世界(現在の延長に近い)、「高い」シナリオのSSP3はナショナリズムが復活する「地域対立」の世界、「非常に高い」シナリオのSSP5は「化石燃料依存」の開発が続く世界というストーリーである(今回採用されていないSSP4は、国内外の不平等や階層化が進む「分断された」世界)。

今回の第1作業部会報告書では5つのシナリオの実現可能性などは論じられていないが、その後発表されたEmission Gap Report (UNEP, 2021)によれば、パリ協定において現状で各国が掲げて

いる排出削減目標や実施している政策のレベルでは、「非常に低い」や「低い」の経路にはまったく乗っておらず、せいぜい「中間」の経路あたりである。つまり、現状の対策レベルでは、今世紀半ばには+2°Cを超えて、今世紀末に+2.7°C前後まで温暖化してしまう。

また、いずれのシナリオでも、2021~40年の直近20年間の平均気温が、産業革命前から+1.5°Cに達してしまう可能性が50%以上と評価された。もはや+1.5°Cの温暖化を確実に避けることはほぼ不可能になったといえるが、それでも「非常に低い」の経路に乗ることができれば、その後+1.5°C前後で温度上昇を止める可能性はまだ残されている。

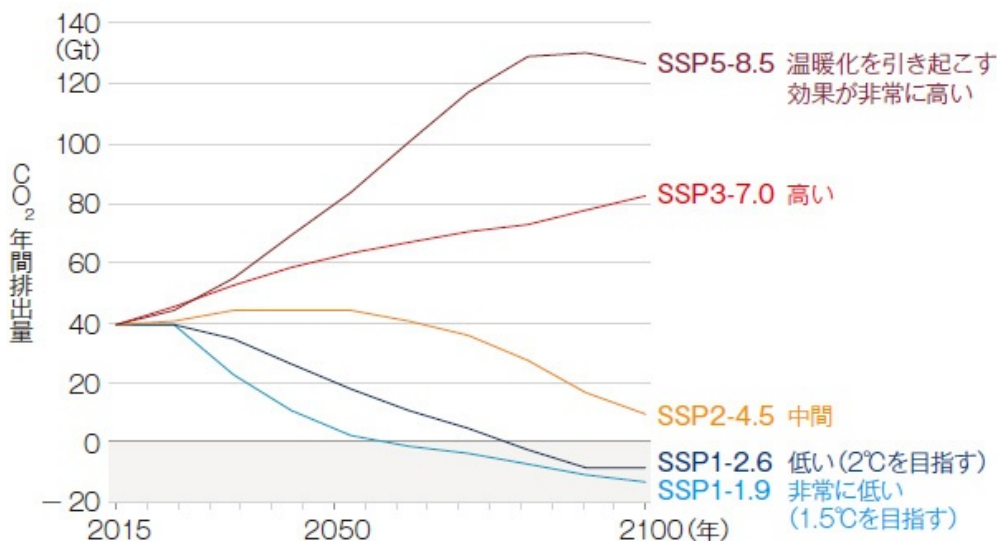


図4 AR6の共通社会経済経路（SSP）と呼ばれるシナリオ群は、社会経済の将来見通しのバリエーションと、AR5で用いられた代表濃度経路（RCP）とを組み合わせたもの。SSP1-1.9が最もCO2排出量が少なく、「1.5°C目標」に相当するシナリオ。SSP1-2.6は「2°C目標」に相当。SSP5-8.5は4°C以上温暖化する最悪のシナリオ。IPCC AR6 WG1 Figure SPM.4より。

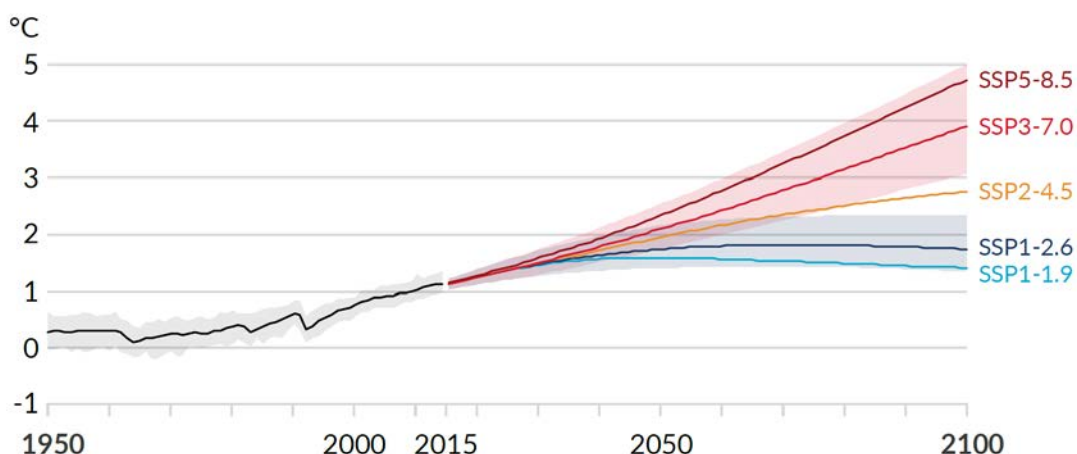


図5 世界平均気温の変化。1850-1900年の平均を基準とする。黒線は過去についてのシミュレーション結果。色線はシミュレーション結果に過去の観測データと平衡気候感度の最新の評価を組み合わせ求めて求めた将来見通しである。「低い」（SSP1-2.6）と「高い」（SSP3-7.0）については、不確かさの幅（90%の可能性の範囲）が示されている。IPCC AR6 WG1 Figure SPM.8aより。

### 5. 残余カーボンバジェット

世界平均気温の上昇量は人間活動によるCO<sub>2</sub>の累積排出量にほぼ比例することがわかっている。こ

のことから、ある温度未満に気温上昇を止める目標を定めると、それまでに排出可能な CO<sub>2</sub> の総量が決まることになる。これを残余カーボンバジェットとよぶ。

今回の報告書で評価された残余カーボンバジェット（表 1）によれば、例えば 67% の可能性で気温上昇を産業革命前より +1.5°C に抑えようとするならば、今後、世界全体で人間活動により排出できる CO<sub>2</sub> の総量は 400 GtCO<sub>2</sub> と推定される。現在、世界の間活動による年間 CO<sub>2</sub> 排出量は 40 GtCO<sub>2</sub> であるため、仮に現在の排出量が続くならばこのカーボンバジェットは 10 年程度で、仮に直線的にゼロまで排出量を減少させる場合でも 20 年程度で、使い果たしてしまうことになる。ただし、この値は CO<sub>2</sub> 以外の温室効果ガスの排出量などによってかなり増減しうることに注意が必要である。

1850～1900 年を基準とする気温上限までのおおその地球温暖化 (°C) *(1)	2010～2019 年を基準とする気温上限までの追加的な地球温暖化 (°C)	2020 年初頭からの 残余カーボンバジェット推定値 (GtCO <sub>2</sub> ) 気温上限までで地球温暖化を 抑制できる可能性*(2)					非 CO <sub>2</sub> [温室効果ガス] 排出削減量のばらつき*(3)
		17%	33%	50%	67%	83%	
1.5	0.43	900	650	500	400	300	非 CO <sub>2</sub> [温室効果ガス] 排出削減量の増減により、左記の値は 220 GtCO <sub>2</sub> 以上増減しうる
1.7	0.63	1450	1050	850	700	550	
2.0	0.93	2300	1700	1350	1150	900	

表 1 残余カーボンバジェットの推定値。IPCC AR6 WG1 Table SPM.2 より。

## 6. 可能性は低いが大規模な影響をもたらすリスク

リスクは必ずしも頻度や確率が定量化できるものばかりではない。可能性は低い（あるいは不明だが）排除はできず、もし起きた場合には大規模な被害をもたらすリスクの存在が今回の報告書では強調された。

世界平均の海面水位は、「非常に高い」排出レベルの SSP5-8.5 シナリオの場合に、1900 年を基準に 2100 年に最大 1m 程度上昇すると見通されているが、これは海水の熱膨張、氷河・氷床の融解など十分に理解されている物理プロセスのみを考慮した場合である。一方、西南極の氷床が不安定化し崩壊が止まらなくなるプロセスの存在が指摘されており、これは本当に起きるかどうかも分かっていないが、起きる可能性を排除できない。もし起きた場合には、2100 年の海面上昇は 1.7m にも達すると考えられる（図 6 左）。

さらに、海面上昇はその後も数百年から数千年続く。「非常に高い」シナリオの場合の 2300 年の上昇量は 2～7m と見通されているが、西南極氷床の不安定化が起きた場合には 15m にも達するとされる（図 6 右）。

他にも、アマゾンの熱帯雨林が温暖化に伴う乾燥化と森林伐採によって枯れるのが止まらなくなり、アマゾン全体がサバンナに移行してしまう可能性を排除できない。また、北大西洋の北部で沈み込む（メキシコ湾の暖流を西ヨーロッパ近くまで運んでいる）暖流が現在弱まってきているが、これが完全に停止して世界の水温分布や雨の分布を変えてしまう可能性を排除できない。

現在の科学では、これらの現象が何°C の温暖化で引き起こされるかは分からない。しかし、気温上昇を低く抑えれば低く抑えるほど、これらの事態が生じる可能性を低くできることは間違いない。このことは、パリ協定の「1.5°C」を目指すべきとする根拠の一つとなると考えられる。

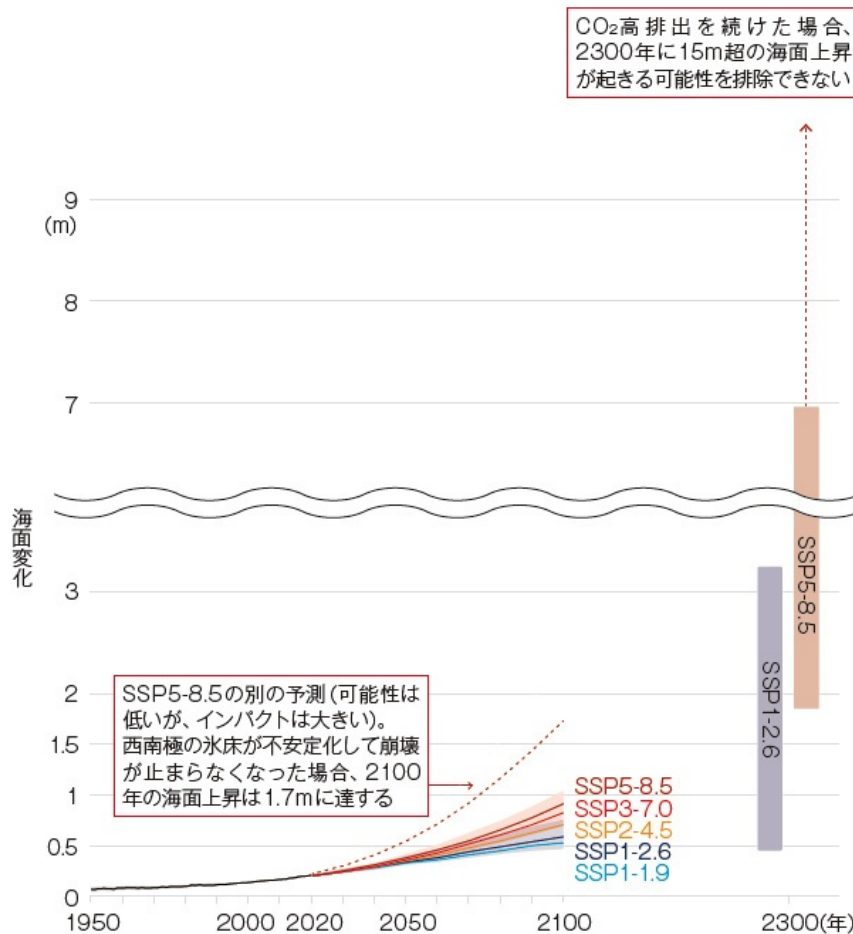


図6 1900年を基準とした世界平均海面水位の変化。SSP5-8.5シナリオの場合、2100年に最大1m程度上昇する見通しだが、南極氷床の崩壊が起きれば1.7mに達するという予測もある(左)。さらに、その後も海面水位の上昇は続き、最悪の場合、2300年の上昇量は15mに達する可能性を排除できない(右)。IPCC AR6 WG1 Figure SPM.8より。

(本稿は「日経ESG」2021年11月号掲載の拙稿「温暖化の実態が明らかに—IPCC第6次評価報告書を読み解く」を基に大幅に加筆修正を行った)

—文献—

IPCC (2021) *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*, Cambridge University Press.

UNEP (2021) *Emissions Gap Report 2021*, UNEP