

2021年9月8日

IPCC 第6次報告・第1作業部会報告 (AR6/WG1) と残余炭素予算

山口光恒

頭書報告のうち残余炭素予算につき下記の通りまとめた。残余炭素予算とは特定の気温目標(例えば 1.5°C目標) 達成に向けて今後排出可能な CO2 の総量である。この内容次第で 1.5°C目標達成に向けて 2050 年 Net-zero が必要かどうかが決まってくるからである。

1、第6次報告第1作業部会での残余炭素予算

本年 8 月 9 日発表の IPCC 第 6 次報告第 1 作業部会報告書の政策決定者のための要約 (Summary for Policymakers, SPM) に炭素予算について下記の表がある。1850~2019 年の人為的 CO2 累計排出量は 2390Gt (幅は上下 240Gt)、気温は 1850-1900 年から 2010-2019 年にかけて 1.09°C上昇 (幅は省略)、1.5°C目標への残余炭素予算は 50%確率だと 500Gt、67%だと 400Gt となっている (SPM p.38)。

AR6/WG1 による残余炭素予算 (Table SPM.2)

Global warming between 1850–1900 and 2010–2019 (°C)		Historical cumulative CO ₂ emissions from 1850 to 2019 (GtCO ₂)				
1.07 (0.8–1.3; likely range)		2390 (± 240; likely range)				

Approximate global warming relative to 1850–1900 until temperature limit (°C)* ⁽¹⁾	Additional global warming relative to 2010–2019 until temperature limit (°C)	Estimated remaining carbon budgets from the beginning of 2020 (GtCO ₂)					Variations in reductions in non-CO ₂ emissions* ⁽³⁾
		Likelihood of limiting global warming to temperature limit* ⁽²⁾					
		17%	33%	50%	67%	83%	
1.5	0.43	900	650	500	400	300	Higher or lower reductions in accompanying non-CO ₂ emissions can increase or decrease the values on the left by 220 GtCO ₂ or more
1.7	0.63	1450	1050	850	700	550	
2.0	0.93	2300	1700	1350	1150	900	

2、第6次報告第2次原案 (SOD) との相違

上記はこのたび公表された WG1 の最終報告であるが、昨年 3 月時点での第 2 次原案 (SOD) では 1850-1900 年から 2010-2019 年の気温上昇は 1.1°C上昇 (幅は省略) としている。その上で残余炭素予算について下記の表がある。WG1/SOD/SPM Table SPM.3 p. SPM40

Additional warming since 2010-2019 (°C) * ⁽¹⁾	Approx. warming since 1850-1900 (°C) * ⁽¹⁾	Remaining carbon budget * ⁽²⁾ per percentiles of TCRE * ⁽³⁾		
		33rd (GtCO ₂)	50th (GtCO ₂)	67th (GtCO ₂)
0.2	1.3	140	90	50
0.3	1.4	320	240	180
0.4	1.5	500	390	310
0.5	1.6	670	540	440
0.6	1.7	850	690	570
0.7	1.8	1030	840	700
0.8	1.9	1210	990	830
0.9	2.0	1390	1140	960
1.0	2.1	1570	1290	1090

この表の一番左の欄は 2010-2019 年以降の気温上昇度合いを、左から 2 番目の欄は 1850-1900 年（以下これを工業化という）以降の気温上昇を示し、最後の欄は工業化以降の気温上昇に依じた残余炭素予算を示している。既に工業化以降 2009-2018 年までの気温上昇が 1.1°C なので、1.5°C 目標の場合には 2009-2018 年以後の気温上昇を 0.4°C 以内に抑えねばならないが、これを 50% 確率で達成するための残余炭素予算は 390Gt、67% 確率なら 310Gt（2°C 目標の場合のそれは 50% 確率だと 1140Gt、67% だと 960Gt）であった。

ここで 1.5°C 目標の残余予算を比べると公表版が SOD 版に比べて 50% 確率で 110Gt（500-390Gt）、67% 確率で 90Gt（400-310Gt）程増えている。SOD から公表版まで約 1 年半の時間差があるが、何が原因で残余炭素予算が増えたのかは詳らかではない。

3、従来の IPCC 報告書における残余炭素予算

今回の第 6 次報告書における残余炭素予算を従来の IPCC 報告書でのそれを比較する前に、これまでに炭素予算を扱った IPCC 報告書（第 5 次報告書及び 1.5°C 特別報告書）の内容をまとめておく

3-1 第 5 次報告書における残余炭素予算

炭素予算の概念が初めて IPCC 報告に登場したのは 2013 年から 2014 年にかけて公表された第 5 次報告書においてである。このときは 1861-1880 年を基準年とし、66% 以上の確率で 2°C 以下に留めるには 1870 年からの累計 CO₂ 排出量を 2900GtCO₂ 以下としなければならない。2011 年までに合計 1900Gt が既に排出されているので残余の炭素予算は 1000Gt（当時の年間 CO₂ 排出量の約 30 年分）であるとされ（第 5 次報告統合報告書 63-64 頁）、世界に大きな衝撃を与えた。当時は 1.5°C 目標はあまりにも低すぎて検討対象外であったが、統合報告書を良く見ると 66% で 1.5°C 以下に抑える場合の炭素予算は 2250Gt、残余炭素予算は 400Gt とある¹。

3-2 1.5°C 特別報告書における残余炭素予算と第 5 次報告のそれとの差

これに対して 2018 年の 1.5°C 特別報告書（以下 SR1.5）では、工業化から 2006-2015 年の気温上昇を約 0.97°C²、2017 年までに 2200GtCO₂ 排出されたとあり、66% 確率で 1.5°C 達成の残余炭素予算を SAT では 420Gt、GMST で 570Gt としていた（50% 確率で目標達成の場合はそれぞれ 580Gt 及び 770Gt、SPM 14 頁）。ここで SAT と GMST は共に気温計測の手法

¹ 炭素予算の 2250Gt から既排出の 1900Gt を引くと 1.5°C の残余炭素予算は 350Gt となるが、何故か報告書には 400Gt とされている（第 5 次統合報告書 64 頁）。四捨五入その他の技術的な理由によるものと思う。

² SR1.5 の政策決定者向け要約（SPM）ではほぼ 1.0°C の上昇とあるが（6 頁）、ここではより厳密に SR1.5 第 2 章の 105 頁の記述から 0.97°C とした。これはすぐ後で説明するように SAT の数値である。GMST 方式では 0.87°C の上昇（SPM 6 頁及び第 2 章 108 頁）。SR1.5 報告では第 1 章で脚注 3 のように IPCC ではこれまで気温は GMST 方式で計測してきたとあるが、第 2 章では 105 頁に於いて SAT 方式での残余炭素予算を示しつつ、IPCC 第 5 次報告書と整合的と主張している。しかも SR1.5 の最後の局面まで GMST 方式による残余炭素予算が示されていたが、最後に SAT のそれにひっくり返ったというように第 1 章の GMST 派（観察派）執筆者と第 2 章の SAT 派（気候モデル派）執筆者の間での齟齬が外部から見える形となっていた。この点は山口光恒「IPCC（気候変動に関する政府間パネル）1.5°C 特別報告書の内容分析と今後の国際交渉への影響」[20190331 IPCC.pdf \(m-vamaguchi.jp\)](https://www.ipcc.or.jp/japanese/20190331_IPCC.pdf) 32 頁以降参照。

であり、SAT (Surface Air Temperature) は陸上海上とも表面近くの気温を気候モデルで計算する方式、GMST (Global Mean Surface Temperature) は陸上は表面近くの観察された気温、海洋については海水の表面温度を観察してこれを加重平均する方式を指す³。特に海洋については海水の表面温度よりも海面近くの大気の方が気温上昇速度が速いので、残余炭素予算としては SAT 方式の方が少ない。SR1.5 での残余炭素予算は下表の通りで SAT を中心に置きつつ GMST のそれも分かる形としている。

SR1.5 における残余炭素予算 (第 2 章 Table 2.2 から抜粋)

Additional Warming since 2006–2015 [°C] ⁽¹⁾	Approximate Warming since 1850–1900 [°C] ⁽¹⁾	Remaining Carbon Budget (Excluding Additional Earth System Feedbacks ⁽⁵⁾) [GtCO ₂ from 1.1.2018] ⁽²⁾		
		Percentiles of TCRE ⁽³⁾		
		33rd	50th	67th
0.3		290	160	80
0.4		530	350	230
0.5		770	530	380
0.53	~1.5°C	840	580	420
0.6		1010	710	530
0.63		1080	770	570

具体的には1.5°C目標の場合、2006-2015迄の気温上昇がSATでは0.97°Cなので残りは0.53°C、GMSTだと0.87°C上昇なので残りは0.63°Cとなり、これに伴い例えば67%確率の場合には残余炭素予算がSATでは420Gt、GMSTでは570Gtとなる。

上記から1.5°C67%の場合の気温計測手法の差による残余炭素予算の差は150Gtであることが分かる。他方、既述の通り同条件での第5次報告書での炭素予算は2250Gtであったが、SR1.5にあるとおり2017年までに2200GtCO₂排出されているので、計算上の残余炭素予算は50Gtの筈である。しかしこれがSR1.5では420~570Gtと大幅に増えており、気温の計測手法の相違(SATかGMSTか)はその差の一部に過ぎない。この点についてはSR1.5のSPM脚注14で「知見の進歩(updated understanding)と方法論の更なる進化(further advances in methods)」によるとある。専門家に聞くとベースライン排出量や基準年の相違などがあるようであるが、筆者にはこれ以上この問題を追及する能力が無い。とはいえたった4年間でこれだけ残余炭素予算が増加するというのは、炭素予算に関する不確実性がまだまだ大きい事を

³ この点についてはSR1.5第1章56頁に下記の通り明快な説明がある。The IPCC has traditionally defined changes in observed GMST as a weighted average of near-surface air temperature (SAT) changes over land and sea surface temperature (SST) changes over the oceans ---中略---, while modelling studies have typically used a simple global average SAT.

示すものであろう⁴。

4、第6次報告書公表版とSR1.5の残余炭素予算の比較

第6次報告書 SPM では工業化から 2011-2020 年迄の Global surface temperature（地球表面の気温）の上昇幅は 1.09°C（陸上が 1.59°C、海洋上が 0.88°C、幅は省略）とした（5 頁）。ここで Global surface temperature については脚注 8 で、これは GMST と SAT の両方を指す言葉としており、この差異は最大 10%としている⁵。確かに SR1.5 では両方式の気温上昇の差はほぼ 10%の幅に収まっており⁶、この表現で SAT と GMST を巡る問題をうまく逃げたといえる。

第6次報告書ではどのような水準であれ、物理的に気温上昇を一定のレベルで抑えるには CO2 の排出を net-zero にする必要があることに初めて触れている。

その上で、累計 CO2 排出量と気温上昇にはほぼニアな関係にあるとの第5次報告書の知見を支持し、累計排出量 1000GtCO2 ごとの気温上昇 (TCRE) は 67%の確率で 0.27~0.63°C 上昇 (best estimate は 0.45°C) とし⁷、この幅は第5次報告書や SR1.5 よりも狭まっている（即ち精度が上がっている）としている。この関係を図にしたのが次頁の図である⁸。なお、精度向上については The Economist 8 月 14 日号に見やすい図が掲げられている。

ここで第6次報告書と SR1.5 の 1.5°C を 67%で達成可能な炭素予算を比較してみよう。第6次報告書では冒頭の表の通り 2019 年までの累計排出量は 2390Gt（前後の幅は省略）、残余排出量が 400Gt なので、炭素予算は 2790Gt である。他方 SR1.5 では 2017 年までの排出が 2200GtCO2 で残余炭素予算は 420~570Gt なので、これを加えると 2620Gt~2720Gt となり、第6次報告書の炭素予算は SR1.5 と比較して 70Gt~170Gt 増えたことになる。とはいえ、SR1.5 のそれが第5次報告書対比で 420~570Gt の大幅増であったのに比べると moderate な増え方である。また、これが最新の研究結果を反映したものであれば、むしろ歓迎すべき現象である。炭素予算の増は 1.5°C や 2°C 目標いずれの場合に関しても目標達成の非現実性を少しでも緩和するのに役立つからである。

ここで頭書の問題意識に立ち返ると、結論としてはこの結果から 1.5°C 達成のためには 2050 年に Net-zero とする必要があるかは即断できず、この点は来年 3 月の IPCC 第 3 作業部会報告書まで待つ必要があるということである。

⁴ 炭素予算についてはこの他 CO2 以外の動向（気温低下効果のあるエアロゾルを含む）、累計排出量と気温上昇の関係を示す TCRE (transient climate response to cumulative carbon emissions) の分布図、過去の気温など大きな不確実性がある (SR1.5 SPM p.96 & 第 2 章 p.108)。

⁵ The term ‘global surface temperature’ is used in reference to both global mean surface temperature and global surface air temperature throughout this SPM. Changes in these quantities are assessed with *high confidence* to differ by at most 10% from one another, but conflicting lines of evidence lead to *low confidence* in the sign of any difference in long-term trend. {Cross-Section Box TS.1}。

⁶ 2006-2015 迄の気温上昇が SAT では 0.97°C、GMST では 0.87°C と違いは 0.1°C で、ほぼ 10%の幅

⁷ 公表版では C で表現しているが、これを CO2 に換算したもの（第6次報告技術要約 5 頁参照）

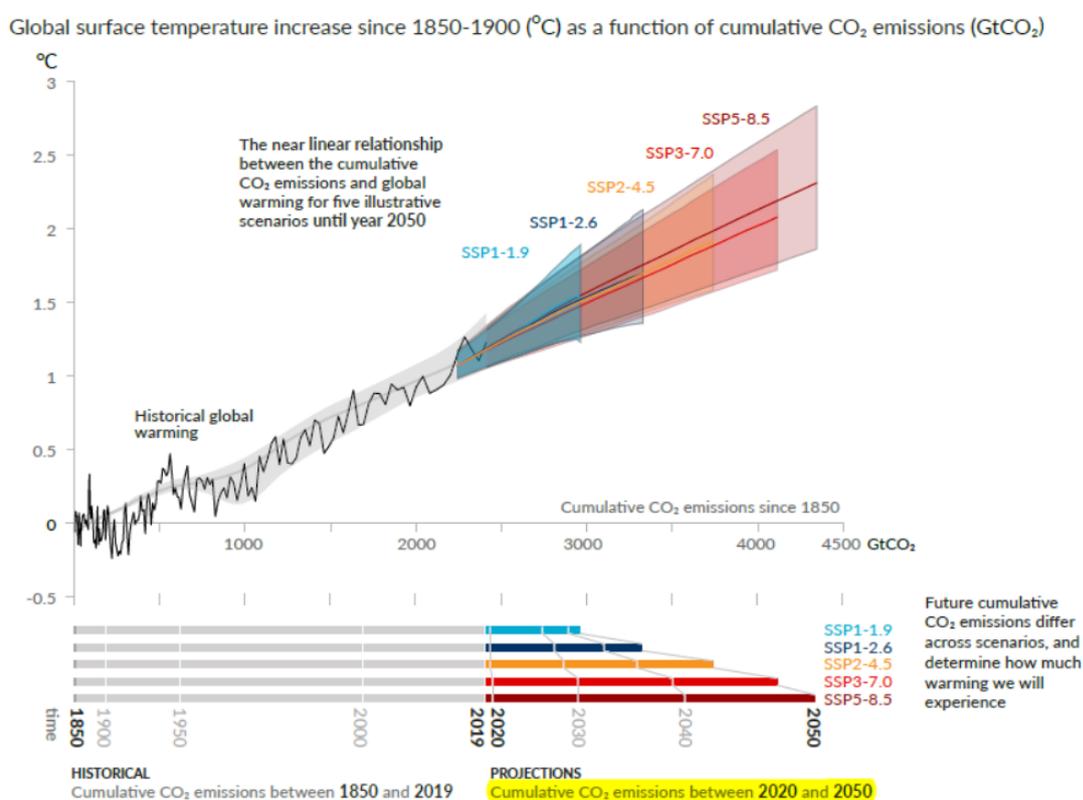
⁸ 但しこの図は 2050 年までとなっている（累計排出量では 4500Gt 弱）。第5次報告では 9000Gt、SR1.5 では 6500Gt 程度まで対象としている。2050 年以降世界が negative emissions となるというのは理想の姿で例外と考えるべきなので、もう少し累計排出量を伸ばした図としてほしかった。

5、第1作業部会報告と11月のCOP26

ここで炭素予算を離れて、第6次報告第1作業部会（温暖化の科学）報告の国際交渉への影響について付言する。IPCCの第6次報告第2（影響及び適応）及び第3（緩和）作業部会報告書は11月のCOP26に間に合わない。つまり報告書の全体像が示されない中で第1作業部会報告書は2050年に世界でnet-zeroを実現しても1.5°Cを超える可能性を指摘している。他方、パリ協定で全ての国が合意したのは2°C目標で、途上国はこれを楯にGlobalな2050年net-zeroに反対している。こうした中で交渉の進展は極めて厳しいと思う。要注視である。

以上

累計CO2排出量と気温上昇の関係 第6次報告書SPM 37頁



上図で横軸は工業化以後の累積CO₂排出量 (Gt)、縦軸はそれに対応する気温上昇を表す。2019年までの累計排出量は2390Gtで、これに対応する気温上昇が1.09°Cになっている。2390Gtに至る黒の線は気温上昇の実績値。黒の線の上下のGreyの帯は気温上昇の幅を示す。2020年以後の排出はSSPごとに異なるのでそれぞれに応じた気温上昇の幅（この幅に90~100%の確率で収まる）で示され、累計排出量の少ない順にSSP1-1.9は青、SSP1-2.6は紫、SSP2-4.5は橙色、SSP3-7.0は赤、SSP5-8.5は焦げ茶色の累計排出量の推移とそれに応じた気温上昇の程度を表す。着色部分の中に同じく色の付いた直線が見えるが、これはそれぞれの色のSSPの気温上昇の中央値 (median) である。なお、SSP(1-5)の後の1.9~8.5は2100年時点での放射強制力を表す (SSP1-1.9はほぼ1.5°C、同2.6は2°C目標達成排出経路に相当)。単年度のCO₂排出量がnegativeに転じるのはSSP1-1.9が2055年頃、SSP2-2.6が2075年前後である(第6次報告書。これ以外はNegativeにはならない)。横軸の更に下に2019年までの累計排出量が灰色の線で示され、以後SSP1.9からSSP8.5の5つのレジシナリオ（数字が増えるにつれて排出量が増える）ごとに2050年までの累計CO₂排出量見込みがカラーで示されている。なお、5つのシナリオの全てで今世紀中に1.5°Cを超える。このうち排出量が最も少ないSSP1-1.9シナリオでは2021-2040年に1.5°C、2041-2060年に1.6°Cとなるが、2081-2100年では1.4°Cに下がる (Best Estimateの場合、第6次報告第1作業部会報告書Table SPM.1、18頁)。