

温室効果ガスの科学的根拠・・・



みんな待ってたね～科学的根拠

CLIMATE CHANGE 2021 THE PHYSICAL SCIENCE BASIS SUMMARY FOR POLICYMAKERS

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)
<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

A～Dの4章立てになっているわ



A章は、気候の現状の説明だけど、**人間の影響が大気、海、陸を暖めたことは明白で、大気、海洋、雪氷圏、生物圏と広範囲に急速な変化が起きていると結論を示唆しているよ**



科学的根拠は？



1750年頃から観測された温室効果ガス (GHG) 濃度は、人間の活動によって明らかに増えた。AR5の報告だけど2011年以降増加を続け、2019年の平均値は、二酸化炭素 (CO₂) が410ppm、メタン (CH₄) が1866ppb、亜酸化窒素 (N₂O) が332ppbに達したようだ



過去60年間で、人間の活動によるCO₂排出量はほぼ一定の割合 (世界的には年間約56%) で、これを陸海で吸収しているが、地域差があるようだ



それで？



21世紀の最初の20年間(2001～2020)の世界平均気温は、
1850～1900よりも0.99 [0.84～1.10]°C高かったそう

それから？



2011～2020年の世界平均気温は、1850～1900年よりも
1.09 [0.95～1.20]°C高く、海上(0.88 [0.68～1.01]°C)よりも
陸地(1.59 [1.34～1.83]°C)で大きく上昇したらしい

それで、それで？



1850～1900年から2010～2019年までの人為的な
世界平均気温上昇は0.8～1.3°Cの可能性が高く、
最適推定値は1.07°Cである

170年間で1°Cちょっと気温が上ったってことよね





GHGは1.0～2.0℃の温暖化に寄与し、人為的要因（主にエアロゾル）は0.0～0.8℃の冷却に寄与し、自然的要因は世界平均気温を-0.1～0.1℃変化させ、内部変動は-0.2～0.2℃変化させた可能性がある

エアロゾルってなに？



大気中に浮遊する微粒子で雲や人為的な煙霧とかだよ

太陽熱を遮るってことね。



1979年以降、GHGが対流圏温暖化の主要因であった可能性が高く、1979年から1990年代半ばにかけて、フッ素等のハロカーボン類は冷媒用に人為的に作った化合物が成層圏オゾン層を破壊した可能性が非常に高い

冷蔵庫を冷やすフロンガスってあったわよね～





陸域の世界平均降水量は1950年以降増加している可能性が高く、1980年代以降は増加率が加速したらしい

温暖化が進んで気化しやすいのかしら



20世紀半ば以降、観測された降水量や海面付近の塩分濃度の変化のパターンには人間の影響が寄与した可能性があるようだ

塩分濃度はなぜかしら？



中緯度の嵐の軌跡は、1980年代以降、両半球で極方向に移動した可能性があり、長期の変化傾向に顕著な季節性がある。南半球で、これと密接に関連する夏季温帯低気圧の極方向への移動に、人間の活動が影響しているようだ

南半球では、台風はサイクロンっていうわね





1990年代以降の氷河の世界的な後退、1979～1988年と2010～2019年の間に北極海 of 海氷面積の減少の要因は人間の活動が影響しているらしい



1979年から2020年にかけて、南極の海氷域では、地域に相反する変化傾向と内部変動がみられ、有意な変化傾向はみられなかった

南極は温暖化の影響がないのかしら



1950年以降、北半球の春の積雪量の減少、過去20年間に観測されたグリーンランド氷床の表面融解に人間の活動が影響したようだが、南極氷床の質量減少に人為的影響はみられない

TVで流氷が増えてる映像見たわ



はっきりとした証拠はまだみたいね





1970年代以降、世界の海洋表層(0~700m)の水温が上昇したことはほぼ確実で、人間の活動が影響している可能性が非常に高いようだ

海面が温められたら気化しやすいわね



現在地球規模で起きている外洋表面の酸性化について、人間が引き起こしたCO₂排出が主な要因であることは確かなようだ

大気中のCO₂を海洋が吸収して酸性化されるのね



20世紀半ば以降、多くの海洋表層で酸素濃度が低下した現象は、人間の活動が影響しているようだ

そうなのね~



世界の平均海面は1901~2018年に0.20[0.15~0.25]m上昇した



海面平均上昇率は1901～1971年に $1.3[0.6 \sim 2.1] \text{mm} \cdot \text{yr}^{-1}$ で、1971～2006年に $1.9[0.8 \sim 2.9] \text{mm} \cdot \text{yr}^{-1}$ に上昇し、2006～2018年に $3.7[3.2 \sim 4.2] \text{mm} \cdot \text{yr}^{-1}$ にさらに上昇した。少なくとも1971年以降の上昇は、人間の活動が影響しているらしい

$\text{mm} \cdot \text{yr}^{-1}$ は、1年(year)で何ミリメートル上昇したかという意味ね

それじゃあ $\text{mm}/\text{年}$ でもいいわね



1970年以降の陸域生物圏の変化は、地球温暖化に連動しているらしい



気候帯は両半球で極方向に移動しており、北半球の中高緯度帯では1950年代以降、生長期は平均して10年ごとに最大2日長くなっている

はい、わかりました





気候システム全体にわたる最近の変化の規模と、
気候システムの多くの側面の現状は、
何世紀・何千年にもわたり前例がなかったらしい

科学的根拠は？



2019年には、大気中のCO₂濃度は少なくとも過去200万年間のどの時点よりも高く、CH₄とN₂Oの濃度は少なくとも過去80万年間のどの時点よりも高かったようだ

それで？



1750年以降、CO₂(47%)とCH₄(156%)の濃度の増加は、少なくとも過去80万年間にわたる氷期と間氷期の間の数千年の自然変動より遥かに多く、N₂O(23%)の増加は同程度らしい

ふ～ん





世界の表面温度は、1970年以降、少なくとも過去2000年間、他のどの50年間よりも急速に上昇している

現象だから事実ね



直近10年間(2011～2020年)の気温は、数世紀にわたり温暖だった約6500年前[1850～1900年に対して0.2～1℃]の気温を上回っている

これも事実っぽいわ



それ以前の温暖期は約125,000年前で、数世紀の気温[1850～1900年に対して0.5～1.5℃]が最近の10年間の観測と重なっているよ

ふ～ん



2011～2020年の北極海の年平均海氷面積は、少なくとも1850年以降最小規模に達した



夏の終わりの北極海の海氷面積は、少なくとも過去1000年間のどの時点よりも小さかった

現象だから事実ね



1950年代は、少なくとも過去2000年間は前例のないものであり、世界のほぼすべての氷河が同様に後退している

これも事実なのね



世界の平均海面水位は、1900年以降、少なくとも過去3000年間のどの世紀よりも急上昇している

ふ～ん



世界の海洋は、氷期の終末期(約11,000年前)よりも過去1世紀の方が急速に温暖化が進んでいる



外洋表層のpHは、過去5,000万年にわたって長期的に上昇し、最近の数十年の低い外洋表層のpHは、過去200万年間でも珍しい現象である

現象だから事実ね



人間が引き起こした気候変動は、既に世界中のすべての地域で多くの極端な天候や気候に影響を及ぼしている

科学的根拠は？



熱波、豪雨、旱魃、熱帯低気圧等の極端な変化が観測された証拠であり、人間の活動によるものという根拠は、AR5以降に示されている

人間の活動と自然現象の相関はあったのかしら？





1950年代以降、ほとんどの陸域で高温(熱波を含む)がより頻繁になり、より激しくなったことはほぼ確実だけど、低温(寒波を含む)は頻度と厳しさは低くなり、その原因は人間の活動にあるらしい

そうなの？



過去10年間に観察された近年の極端な暑さの一部には、気候システムに人間が関与しているからと言われている

ふ～ん



海洋熱波の頻度は、1980年代以降ほぼ2倍になり、少なくとも2006年以降、人間の影響が多く海洋熱波に寄与している可能性が非常に高い

具体的にどんな影響を与えているのかしら





豪雨の頻度と激しさは、変化傾向の分析に十分な観測データがある陸のほとんどで、1950年代以降増えており、人間の影響による気候変動が主な要因らしい

そうなんだ



人間の影響による気候変動は、陸の蒸散量の増加によって、一部地域で農業の早魃・生態学的早魃の増加に寄与しているようだ

ふ～ん



1950年代から1980年代にかけての世界の陸域モンスーン降水量の減少は、部分的には人為的な北半球のエアロゾル排出に起因するようだが、それ以降の増加は、GHG濃度の上昇と、数十年規模の内部変動によるらしい



南アジア、東アジア、西アフリカでは、GHG排出による温暖化を通じてモンスーン降水量の増加は、20世紀における人為的なエアロゾル排出で冷却されたモンスーン降水量の減少によって相殺されたいらしい

相殺されても豪雨被害は消えない



1980年代以降の西アフリカのモンスーン降水量の増加は、一部にはGHGの影響の増大と、欧州・北アフリカでの人為的なエアロゾル排出の冷却効果の低下によるらしい

なるほど



過去40年間で、強い(カテゴリ3~5)熱帯低気圧の発生の世界的な割合が増加し、北西太平洋の熱帯低気圧が上げ示唆のピークに達する緯度が北に移動した可能性があり、これらの変化は、内部変動だけでは説明できない

現象を自然の内部変動だけで説明できないのね



全カテゴリーの熱帯低気圧の頻度の長期的
(数十年～百年)な変化傾向に対する根拠は低い

ふ～ん



現象・帰属研究、物理的理解は、人為的な気候変動が
熱帯低気圧に関連する豪雨を増加させることを示して
いるが、データの制限により、地球規模での過去の変
化傾向の明確な検出はできていない



1950年代以降、人間の影響により、複合的で極端な
現象の発生確率が高まった可能性がある



これには、地球規模での熱波と旱魃の同時発生、人が
住む全ての大陸の一部地域における自然火災が起きや
すい気象条件、複合的な洪水の頻度の増加が含まれる



気候プロセス、古気候の証拠、放射強制力の増加に対する気候システムの応答に関する知識の向上により、AR5と比較して狭い範囲で、 3°C の平衡気候感度の最適推定値が得られるらしい

3°C ね



1750年と比較して2019年は $2.72[1.96\sim3.48]\text{Wm}^{-2}$ の人為的放射強制力が、気候システムを暖めてきたようだ

放射強制力って？



地球に出入りするエネルギーが気候に対して持つ放射の大きさのことだよ



放射強制力は、AR5と比較すると 0.43Wm^{-2} (19%)増加し、うち 0.34Wm^{-2} は2011年以降のGHG濃度の増加によるものだよ



簡単に言うと、温暖化は正の放射強制力で、寒冷化は負の放射強制力だ



IPCCでは、成層圏調整後放射強制力について、対流圏の圏界面における平均的なネットの放射の変化と定義しているよ



面に対する変化したエネルギーを示しているからワット毎平方メートルという単位を使うんだよ

そうなのね



単位は Wm^{-2} ？



Wm^{-2} は、 W/m^2 のことね



わかったわ。話を戻して





この温暖化は主にGHG濃度の増加によるものであり、エアロゾル濃度の増加による冷却によって部分的に減るようだ

それで？



人為的な正味の正の放射強制力は、気候システムに追加のエネルギー(加熱)の蓄積を引き起こすけど、地表の温暖化に応じて宇宙へのエネルギー損失が増加することで部分的に軽減される

温暖化の数値は？



観測された気候システムの平均蓄熱率は、1971～2006年の $0.50 [0.32 \sim 0.69] \text{ Wm}^{-2}$ から、2006～2018年の $0.79 [0.52 \sim 1.06] \text{ Wm}^{-2}$ に増加した。気候システムの蓄熱率の91%は海洋温暖化で、陸域温暖化・氷の喪失・大気の温暖化はそれぞれ約5%・3%・1%を占めるようだ



気候システムの蓄熱は、陸地での氷の喪失と海洋温暖化による熱膨張により、世界の平均海面上昇を引き起こしたようだ

ツバルとか？



熱膨張は1971～2018年に海面上昇の50%を説明できて、氷河・氷床からの氷の喪失は22%・20%、陸の貯水量の変化は8%だった。2010～2019年の氷床喪失率は、1992～1999年の4倍だった

それで？



それから、2006～2018年に世界の平均海面上昇の主な原因は、氷床と氷河の質量損失だったらしい

そうなのね





平衡気候感度は、気候が放射強制力にどのように反応するかを推定するために使用される重要な尺度なんだ

ふ〜ん



複数の証拠に基づく、平衡気候感度の可能性が非常に高い範囲は、2〜5°Cのようだ

それで？



AR6で評価された最良推定値は3°Cで、2.5〜4°Cの範囲は可能性が高く、AR5では1.5〜4.5°Cの範囲が可能性が高く、最良の推定値は得られなかったんだ

今回精度が上がったのね



じゃあ、次のB章にいきましょう





AR5よりも広範囲に温室効果ガス(GHG)、土地利用、大気汚染物質の将来に対する気候の応答を評価するために、5つの新しい例示的な排出シナリオを検討しよう

は〜い



この一連のシナリオは、気候システムの変化に関する気候モデルの予測には、太陽活動と火山からの影響も考慮しているよ

そうなのね



21世紀の予測は、1850～1900年を基準として、短期(2021～2040年)・中期(2041～2060年)・長期(2081～2100年)を比較しているよ

わかったわ





世界の平均気温は、考慮されるすべての排出シナリオの下で、少なくとも今世紀半ばまで上昇し続けるよ。今後数十年の間にCO₂やその他の温室効果ガス排出量が大幅に削減されない限り、21世紀には1.5℃・2℃の温暖化を超えるだろう



1850～1900年と比較して、2081～2100年の世界の平均気温は、検討した非常に少ないGHG排出シナリオ(SSP_{1-1.9})で、1.0～1.8℃高くなる可能性が非常に高いね



中間シナリオ(SSP_{2-4.5})・非常に多いGHG排出シナリオ(SSP_{5-8.5})では2.1～3.5℃・3.3～5.7℃高くなるかも。世界の平均気温が1850～1900年と比較して2.5℃以上高い水準を維持していた最後の時期は300万年以上も前だ

そうなんだ





5つの例示シナリオはSSP_{x-y}と呼ばれ、SSP_xは共有された社会経済経路を指し、SSPはシナリオの根底にある社会経済的傾向を表し、yは概算を指すんだ

は〜い



5つのシナリオは、SSP_{1-1.9}、SSP_{1-2.6}、SSP_{2-4.5}、SSP_{3-7.0}、SSP_{5-8.5}で以下の表にまとめたよ

そうなのね



シナリオ	短期 2021-2040		中期 2041-2060		長期 2081-2100	
	最適推定値 (°C)	可能性が非常に 高い範囲 (°C)	最適推定値 (°C)	可能性が非常に 高い範囲 (°C)	最適推定値 (°C)	可能性が非常に 高い範囲 (°C)
SSP _{1-1.9}	1.5	1.2~1.7	1.6	1.2~2.0	1.4	1.0~1.8
SSP _{1-2.6}	1.5	1.2~1.8	1.7	1.3~2.2	1.8	1.3~2.4
SSP _{2-4.5}	1.5	1.2~1.8	2.0	1.6~2.5	2.7	2.1~3.5
SSP _{3-7.0}	1.5	1.2~1.8	2.1	1.7~2.6	3.6	2.8~4.6
SSP _{5-8.5}	1.6	1.3~1.9	2.4	1.9~3.0	4.4	3.3~5.7

どう読むの？





例えば、GHG排出が多い・非常に多いシナリオの SSP_{3-7.0}・SSP_{5-8.5}は、1850～1900年と比較して中期・長期的に、温暖化が2°Cを超えてしまうね

なるほど



中間シナリオの SSP_{2-4.5}でも温暖化は2°Cを超える可能性は非常に高いね

そうなのね



非常に少ないGHG排出シナリオ SSP_{1-1.9}と少ないGHG排出シナリオ SSP_{1-2.6}では、温暖化が2°Cを超える可能性は非常に低いか、または可能性が低いね



中期(2041～2060)で、2°Cの温暖化水準を超えるのは、非常に多いGHG排出シナリオ SSP_{5-8.5}で可能性が非常に高く、多いGHG排出シナリオ SSP_{3-7.0}で可能性が高く、中間GHG排出シナリオ SSP_{2-4.5}で可能性はやや高いかな



この報告書で検討している中・高・非常に高いシナリオ
(SSP_{2-4.5}、SSP_{3-7.0}、SSP_{5-8.5})の下では、1850～1900年と
比較して今世紀に1.5℃の温暖化水準を超えてしまうね

ふ～ん



5つのシナリオは、短期(2021～2040年)で、1.5℃を超
える温暖化は、非常に多いGHG排出シナリオSSP_{5-8.5}で可
能性が非常に高く、中間SSP_{2-4.5}・多いGHG排出SSP_{3-7.0}、
では可能性がある。

ただ、少ないGHG排出SSP_{1-2.6}シナリオでは超えない可能
性が高く、非常に少ないGHG排出SSP_{1-1.9}シナリオでは可
能性はやや高い程度かな

そうなのね





非常に少ないGHG排出SSP_{1-1.9}シナリオの場合、長期(2081～2100年)では、世界平均気温が1.5℃の温暖化を0.1℃以上超えない一時的なオーバーシュートが発生しつつ1.5℃未満に戻るよう低下するだろう

なるほど



実質的な自然変動により、任意の1年間の世界平均気温は、長期的な人為的傾向より上下に変動するだろう。1850～1900年と比較して、平均気温が特定の水準(例：1.5℃・2℃)を超えて変化することがあっても、温暖化水準に達したわけではないんだ

自然変動って？



人間の影響を受けずに発生する気候変動、つまり、火山噴火、太陽活動の変化、長期では軌道効果やプレートテクトニクス等の外部要因と組み合わされた内部変動を指すんだ



気候システムの変化は、温暖化の進行に直接関係して大きくなる。それらは、極端な高温、海洋熱波、豪雨の頻度と強度の増加、一部の地域での早魃や激しい熱帯低気圧の割合の増加、北極海の海氷、積雪、永久凍土の減少を含むんだよ



陸面が海面よりも1.4~1.7倍暖かくなり続けることはほぼ確実らしい。北極圏が平均気温よりも暖かくなり続けることはほぼ確実で、速度は温暖化の2倍を超える可能性があるんだ



温暖化がさらに進むたびに、極端な変化はさらに大きくなり続けるらしい。例えば、温暖化が0.5℃進むごとに熱波を含む高温となる可能性が非常に高く、豪雨や一部の地域で生態学的早魃等頻繁に認識できるようになるよ

農家の人は大変だわ





一部の地域では、 0.5°C の温暖化が進むごとに、気象旱魃の強度と頻度の識別可能な変化は、減少する地域よりも増加する地域が多くなっているよ

そうなの？



一部の地域では、温暖化が進むにつれて、水文学的旱魃の程度がひどく、頻度が増える

水文学って地球の水循環を研究する学問よね



いくつかの極端な災害の発生は、 1.5°C の温暖化でさえ、温暖化が進むにつれ、観測記録では前例のない水準で増えるだろう。発生頻度の予測変化率は、まれな現象ほど大きくなるよ

自然災害が増えるのね・・・





一部の中緯度・半乾燥地域・南米モンスーン地域では、最も暑い日の気温の上昇が最も高く、その速度は温暖化の約1.5～2倍になると予測される

そうなの？



北極圏では、最も寒い日の気温の上昇が最も高く、その速度は温暖化の約3倍になると予測される

ふ～ん



温暖化が進むにつれ、特に熱帯と北極圏では、海洋熱波の頻度が増え続けるらしい

変動が激しくなるのね



温暖化が進むと、多くの地域で豪雨となり、頻繁に起きる可能性が非常に高くなるようだ



地球規模では、極端な日降水量現象は、
1°C温暖化が進むごとに約7%強まるらしい

へえ？



強烈な熱帯低気圧の割合(カテゴリー4-5)と
最も強烈な熱帯低気圧の最大風速は、温暖化の進行
とともに地球規模で増加すると予測されているよ

風、つよ！



温暖化の進行は、永久凍土層の融解、季節的な積雪、陸氷・
北極海氷の喪失をさらに拡大すると予測されているんだ



北極圏は、5つの例示的なシナリオの下で、2050年までに
少なくとも1回、9月に実質的に海氷がなくなる可能性がある
。南極の海氷の減少予測は信頼性が低い



継続的な温暖化は、その変動性・モンスーン降水量・降水・乾燥現象の深刻さを含む、地球規模の水循環を激しくさせるだろう

そうなのね～



AR5以降、地球規模の水循環は気温が上昇するにつれて激化し続けるという頑健な証拠があり、降水量と地表水の流れは、季節内・年ごとにほとんどの陸域で変動が大きくなると予測される

ふ～ん



世界の平均年間降水量は、1995～2014年と比較して2081～2100年で、非常に少ないGHG排出SSP_{1-1.9}シナリオが0～5%、中間のGHG排出SSP_{2-4.5}シナリオが1.5～8%、非常に多いGHG排出SSP_{5-8.5}シナリオが1～13%増加するらしい



降水量は、高緯度・太平洋赤道帯・モンスーン地域の一部で増加するようだけど、SSP_{2-4.5}、SSP_{3-7.0}、SSP_{5-8.5}で、亜熱帯の一部と熱帯の限られた地域では減少するらしい

雨の量が減るの？



季節平均降水量の検出可能な増減を経験する世界の陸地部分は、増えるらしいよ

ふ～ん



雪に覆われている地域では、春に雪が融けだす時期が早まっている可能性が高く、夏季の流量が減って、春季の最大流量がさらに増えるらしいね

そうなのね





温暖な気候は、非常に湿った非常に乾燥した天候や気候の状態や季節の変化を強め、洪水や旱魃に影響を及ぼすけど、これらの現象の場所と頻度は、モンスーンや中緯度の嵐の軌跡を含む地域の大気循環の変化によるんだ

変化が激しいのね



エルニーニョ南方振動に関連する降雨変動は、 $SSP_{2-4.5}$ ・ $SSP_{3-7.0}$ ・ $SSP_{5-8.5}$ シナリオで21世紀後半までに増幅される可能性が非常に高いんだ

ふ～ん



モンスーンの降水量は、世界規模で中長期的に増加すると予測されていて、特に、南アジア・東南アジア・東アジア・サヘル西端を除く西アフリカで増えるらしい

は～い





南半球の夏季の中緯度の嵐の軌跡とそれに関連する降水量の南方移動と激しさの増大は、GHG排出が多いSSP_{3-7.0}・SSP_{5-8.5}シナリオの下で起きる可能性が見込まれるが、短期的には成層圏オゾン回復の効果がこれらの変化を打ち消すようだ

オゾンが調整してくれるの？



北太平洋での嵐・降水量の継続的な極方向への移動は可能性があるが、北大西洋の嵐の軌跡で予測される変化についてはよくわからない

科学的根拠が薄いのね



CO₂排出量が増加するシナリオでは、海洋と陸地の炭素吸収源が、大気中のCO₂の蓄積を遅らせる効果は低いようだ

つまり、大気中にCO₂が蓄積していくってことよね





陸と海の炭素吸収源は、CO₂排出量が少ないシナリオと比較して、多いシナリオほど絶対量としてより多くのCO₂を吸収するらしいけど、効果は低下するんだ

弱まっていくのね



つまり、陸と海が占める排出量の割合が、蓄積していくとCO₂排出量の吸収力が弱まっていくんだ

吸収するにも限界があるってことね



その結果、大気中に残留する排出CO₂の割合が高くなるらしい

それって、トレード・オフの関係にあるってことよね





モデルの予測に基づく、今世紀の大気中のCO₂濃度を安定させる中間シナリオSSP_{2-4.5}では、21世紀後半に陸と海が吸収するCO₂の割合が減少するらしい

21世紀後半が限界？



非常に少ないGHG排出SSP_{1-1.9}・少ないGHG排出SSP_{1-2.6}シナリオでは、21世紀にCO₂濃度がピークに達し減少すると、大気中のCO₂濃度の減少に応じて、陸と海が吸収する炭素量が減り、SSP_{1-1.9}の下で2100年までに弱いネットの放出源に変わるかも

炭素を放出しちゃうの？



ネットの負の排出がないシナリオSSP_{2-4.5}・SSP_{3-7.0}・SSP_{5-8.5}では、2100年までに世界の陸と海を合わせた吸収源が放出源になる可能性は低いね

とりあえずよかった





気候変動と炭素循環の間のフィードバックの大きさは大きくなるけど、CO₂排出量が多いシナリオでは不確実になるよ

21世紀後半が限界？



ただし、気候モデルの予測では、2100年までの大気中のCO₂濃度の不確実性は、各排出シナリオの違いによるんだってさ

5パターンによって違うのね



温暖化に対する更なる生態系の応答のうち気候モデル完全には含まれていない湿地、永久凍土の融解、森林火災からのCO₂・CH₄フラックス等が、大気中にこれらのガス濃度をさらに増加させるようだ



過去および将来の温室効果ガス排出による多くの変化、特に海洋、氷床、海面水位の変化は、何世紀から何千年という時間単位で不可逆的なんだ

元に戻らないってこと？



山岳・極地氷河は、数十年または数世紀にわたって融解し続けることはわかっているよ



永久凍土の融解後の永久凍土に含まれる炭素の放出は、100年単位の尺度で不可逆的なんだ



21世紀にわたって氷が失われ続けることは、グリーンランド氷床にとっては確実で、南極氷床にとっても恐らく確実だろう。グリーンランド氷床からの総氷損失は、炭素累積排出量の増加とともに大きくなっていくようだ

海面が上昇するかしら？





世界の平均海面水位は21世紀にわたって上昇し続けるようだ



1995～2014年と比較した世界平均海面上昇の可能性

GHG排出シナリオ		2100年	2150年
非常に低い	SSP _{1-1.9}	0.28～0.55m	0.37～0.86m
低い	SSP _{1-2.6}	0.32～0.62m	0.46～0.99m
中程度	SSP _{2-4.5}	0.76m	0.66～1.33m
非常に高い	SSP _{5-8.5}	0.63～1.01m	0.98～1.88m

結構上がるのね



氷床プロセスの不確実性が高く、世界の平均海面上昇は、非常に多いGHG排出SSP_{5-8.5}シナリオでは2100年までに2m、2150年までに5mを超える可能性を排除できないようだ

東京駅の標高は3.3mなんだけど・・・





長期的には、深海の温暖化と氷床の融解が続くため、海面水位は何世紀から何千年もの間上昇するらしい

陸地が減っちゃう。領土争いはしないでね



今後2000年間で、世界の平均海面水位は、温暖化が1.5℃に抑えられた場合約2～3m、2℃に制限できた場合は2～6m、5℃の温暖化で19～22m上昇するらしい

真実なら温暖化を止めないとね



それはその後の数千年にわたって上昇し続けるらしい



世界の気温が1850～1900年よりも0.5～1.5℃高い可能性が非常に高かった約125,000年前は、今よりも5～10m高かった可能性がある

大陸移動はもっと前かしら





そうだとすれば、気温が2.5～4℃高かった約300万年前の世界では、海面水位は5～25m高かっただろう

地殻変動は治まっていたのかしら？



C章に突入！リスク評価と地域適応のための気候情報



物理的な気候情報は、気候システムが人間の影響、自然の推進要因、内部変動の相互作用にどのように応答するかをみてみよう



可能性が低く影響が大きい結果を含む気候に関する知識は、気候サービス(気候関連のリスクの評価と適応計画)に情報を与えるんだ

科学的証拠という情報ね





そうだよ。世界中の地域地区で物理的な気候情報は、観測結果、気候モデルの結果、調整された診断など、複数の証拠から作成されるんだ

は〜い



自然の推進要因と内部変動は、特に地域規模で、短期的には、人為的な変化を変調してくれる。しかし、100年単位の温暖化への影響はほとんどないようだ

自然の力ってありがたいわ〜



考えられるすべての変化を検討する場合には、これらの変調も考慮することが重要だね

そうね〜





歴史的な世界平均気温の記録では、10年ごとの変動が、人為的な要因で長期的に変化してきたことが判っていて、この変動は今後も続くだろう

気候変動の原因は人間の活動によるものなのね



太陽や火山活動の10年単位の内部変動は、1998～2012年に人為的な温暖化を部分的に緩和し、顕著な地域的・季節的特徴を示した

自然の治癒力を超えた部分でゲリラ豪雨になってるとか？



それにもかかわらず、気候システムの蓄熱が続いて、海の温暖化と陸地の極端な高温の上昇が続いたよ

徐々に自然資本の自浄作用が弱まっていったのね





平均的な気候や極端な現象を含む気候影響要因(CID)による予測可能な人為的な変化は、内部変動によって増幅・減衰するよ



現在の気候に関して、特定の場所で短期間に冷える可能性があって、人間の影響による世界の平均気温の上昇と一致するんだ

CIDってなに？



CIDは、社会または生態系の要素に影響を与える物理的な気候システムの状態のことで、タイプには、寒暑、乾湿、風、雪・氷、沿岸・外洋が含まれるよ



内部変動は、多くの陸地で、観測される人為的な数十年平均の降水量の変化の増幅・減衰の原因になっている。地球・地域規模で、短期的なモンスーンの変化は内部変動の影響に左右される



内部変動要因に加え、地球・地域規模で短期的に予測される降水量の変化は、モデルの不確実性と自然・人為エアロゾル強制力の不確実性によっても不確実でわからない

わからないんだ



古気候と歴史的証拠に基づく、21世紀に少なくとも1回の大規模な爆発的な火山噴火が発生する可能性があるらしい



こんな噴火は、平均気温と降水量を、特に陸地で1～3年間低下させ、地球規模のモンスーン循環を変化させ、極端な降水を変化させ、多くのCIDを変化させるだろう

怖いわね～



だから、そんな噴火が発生したら、これは一時的かつ部分的に人為的な気候変動を緩和するんだらうね

人工的な要因がわかんなくなっちゃうわね





さらなる地球温暖化に伴い、すべての地域で、気候の影響要因の同時多発的な変化がますます起きるようになるらしい



いくつかのCIDの変化は、1.5℃の温暖化と比較して2℃の場合に、より広範囲に及び、温暖化水準が高まるとさらに広範囲に及ぶようになるね

CIDの変動を抑えないとね



すべての地域で、さらに高温のCIDが増え、低温のCIDが減っていくらしい



永久凍土、雪、氷河・氷床、湖と北極海の氷は、さらに減っていくらしい

海面の水位が上がっちゃうわね～





これらの変化は、 2°C 以上の温暖化では
 1.5°C よりももちろん大きくなる



例えば、より高い温暖化では、農業と健康に
関連する極端な気温が下がる閾値を、頻繁に
超えてしまうかもしれない

採れる作物の品種が変わっちゃうわ



1.5°C の温暖化では、アフリカとアジア、北米、
欧州のほとんどの地域で、豪雨とそれに伴う洪水
が激しくなり、より頻繁になるようだ



また、1850～1900年と比較して、アジアを除く全ての
大陸のいくつかの地域で、より頻繁に深刻な農作物被
害及び生態学的旱魃が起きるようだ

食糧危機？





気象学的旱魃もいくつかの地域で増えていくだろう



少数の地域では、平均降水量が変動するだろう

食べ物が採れなくなると困るわ



2℃以上の温暖化では、1.5℃の場合と比べて、
旱魃と豪雨が増え、平均降水量の変動が大きくなるよ



豪雨とそれに伴う洪水は、太平洋諸島・北米・欧州の
多くの地域でより激しく頻繁に起きるらしい



これらの変化は、豪州周辺、中南米の
一部の地域でも見られるね

具体的な地域が出てくると
不安が高まってくるんだけど...





アフリカ・南米・欧州のいくつかの地域では、
深刻な農作物被害・生態学的早魃が頻繁に起きるようだ

困るわ



豪州周辺・中北米・カリブ海でも
同様の事象が頻繁に起きるそう



アフリカ・豪州周辺・欧州・北米の少数の地域も水文学的早魃
が増えるらしく、いくつかの地域は気象学的早魃の増減の影響
を受けようで、より多くの地域で増えていくようだ

どうしようもないわね



1.5℃の温暖化と比較して、2℃以上では
より多くの地域でより多くのCIDが変化するらしい

ふ～ん





地域固有の変化は、熱帯低気圧・温帯低気圧の激化、河川洪水の増加、平均降水量の減少と乾燥度の増加、森林火災を呼ぶ気象条件の増加等があるね

そうなの



雹、氷の嵐、激しい嵐、砂嵐、大雪、地滑り等のCIDの潜在的な将来の変化はあまりみられないね

へ～え



地質学的な土地隆起率が高い一部地域を除いて、地域の相対海面水位が21世紀を通じて上昇していく可能性が高い



世界の海岸線の約2/3は、世界の平均海面水位の上昇量の±20%以内らしい

やっぱり陸地が減っちゃうの？





都市は人為的な温暖化を局所的に強め、さらに頻繁な酷暑とともに都市化が進むと、熱波の深刻度が高まるね

多治見市や熊谷市だけじゃないわね



都市化はまた、都市の風上・風下での平均及び大量の降水量を増加させ結果として流出強度を強めてしまう

駅や道路が水浸し



沿岸都市では、より頻繁な極端な海面現象（例：海面上昇・高潮）と極端な降雨・河川流量の組み合わせにより、洪水の発生確率が高まるね

泣きっ面に蜂だわ



多くの地域で、温暖化が高い確率で複合現象が起きる可能性が高まると言われているよ



特に、同時発生する熱波と早魃はより
頻繁になる可能性があるそうだ

これ以上暑くなるの...



1.5℃の温暖化と比較して2℃以上では、
作物生産地域を含む複数の場所で極端な
気候現象がより頻繁に起きそうだ

勘弁してよ



氷床の崩壊、急激な海洋循環の変化、いくつかの複合
的な極端な現象、将来の温暖化の発生の可能性の高さ
や可能性の低い結果も否定できず、いずれもリスク評
価の一部だね

困ったわね





GHG排出が少ないシナリオを含む、特定のGHG排出シナリオで温暖化の発生確率が非常に高い範囲を超える場合、地域の降水量やその他のCID等気候システムの多くの場面における地球規模・地域の変化も高い範囲を超えるようだ

そうなのね～



可能性が低い温暖化の結果は、より激しく、より頻繁な熱波や豪雨等による影響や人間と生態系に対する高いリスクと関連していて、特にGHG排出が多いシナリオに大きな影響が出る

勘弁してよ



可能性が低くても影響が大きい結果は、特定のGHG排出シナリオで、可能性が非常に高い範囲の温暖化の場合でも、地球規模・地域で発生する可能性があるね



可能性が低くても影響が大きい結果の発生確率は、
温暖化水準が高いほど高くなるよ

そうなのね～



南極氷床の融解が大幅に増え、森林の立ち枯れなど、
気候システムの突然の応答や転換点を排除すること
はできないね

そうよね



温暖化が進むと、過去・現在の気候で確率が低かった
いくつかの複合的な極端な現象が頻繁になり、観測記
録で前例のない強度、が増し、期間が延び、空間が広
がる現象が発生する可能性が高まっていく

負の連鎖ね





大西洋子午線循環は、すべての排出シナリオで21世紀にわたり弱まる可能性が非常に高いね

そうなのね～



2100年以前に突然停止することはなさそうだよ

ちょっと安心



突然停止したら、熱帯雨林帯は南方に移動し、アフリカとアジアのモンスーンが弱まり、南半球のモンスーンが強まり、欧州が乾燥するとか、地域の気象パターンと水循環に突然の移動を引き起こす可能性が非常に高いね

水の循環を守らなきゃ





人間の影響とは関係がない予測不可能で稀な自然現象は、可能性は低くても影響は大きくなる可能性があるよ

自然の驚異ね



例えば、過去数十年以内に一連の大規模な爆発的な火山噴火が発生し、数十年にわたり世界的・地域的な気候変動を引き起こした事例とか

箱根とか？



こんな現象は将来的に除外することはできないけど、固有の予測不可能性だから、この報告書の例示的なシナリオには含めてはいないよ

天災だからね～



最終D章は、将来の気候変動の抑制についてね



AR5以降、残余炭素収支の推定は、SR1.5で最初に提示した新しい方法論、更新した証拠、及び複数の証拠の統合によって改善されたんだ



そうなのね



シナリオで考えられる将来の大気汚染対策の包括的な範囲は、気候と大気汚染の予測に対する様々な仮定の影響を一貫して評価するために使われたよ



新しい開発は、排出削減に対する気候応答が、内部変動や自然要因への応答を含む、自然変動を超えて識別可能になる時期を確認できるようになったよ



へ～え





自然科学的見地から、人為的な温暖化を特定の水準に制限するには、累積CO₂排出量を抑制し、少なくともネットゼロのCO₂排出量に達するとともに、他の温室効果ガス排出量も大幅に削減する必要があるね



CH₄排出量の強力で迅速かつ持続的な削減は、エアロゾル汚染の減少に伴う温暖化効果を抑制し、大気の質を改善するよ

そうなのね



このAR6報告書は、累積的な人為的CO₂排出量とそれらが引き起こす温暖化との間にほぼ線形の関係があることを発見したAR5を再確認したんだ

5年前の科学的根拠の再確認ね





累積CO₂排出量が1000GtCO₂増えるごとに、世界の平均気温を0.27～0.63℃上昇させる可能性が高いと評価しており、最良推定値は0.45℃らしい

1000GtCO₂って何？



CO₂としての質量を10億ト、単位で表した単位のことだよ

わかりました



これを累積炭素排出量に対する一時的気候応答 (TCRE) というんだ

TCREってなんの略？



Transient Climate Response to Cumulative Carbon Emissions
の略だよ

それで？



累積炭素排出量と気温上昇との定量的な
対応関係のことをTCREというんだ

排出量と気温上昇の科学的関係は？



この関係は、人為的CO₂排出量をネットゼロにする
ことは、人間が誘発する地球の気温上昇をあらゆる
水準で安定させるための要件になるんだ

ネットゼロって？



人為的二酸化炭素(CO₂)排出量が、指定された期間にわたる
人為的CO₂除去によって均衡が取られている状態を言うんだよ

わかりました～



それで、相関関係と因果関係が一致してるってこと？



地球の気温上昇を特定の水準に抑制することが、累積CO₂排出量を炭素収支内に抑制することを意味するんだ



ここが重要ね！
温暖化ガス削減の根拠はこれね？



炭素収支という用語は、他の人為的気候変動要因の影響を考慮に入れて、温暖化を特定の確率で特定の水準に制限する結果となる、累積的なネットの人為的CO₂排出量の最大量を指すんだ



この収支は、期間によって異なるから注意が必要だよ



産業革命前の期間からは総炭素収支、最近指定された日付からは残りの炭素収支と言うんだ



残りの炭素収支？



温暖化を特定の温度水準未満に保ちながら、
どれだけのCO₂の量を排出できるかってことだよ



次の2つの表をみてみよう

上の表はどう見るの？



1850～1900年の50年間から2010～2019年の
9年間に、1.07℃気温が上昇したようだね

今までの話だと温暖化ガスが増えたってことよね？



1850年から2019年の間に、累積2390±240の
人為的CO₂のGtCO₂が、排出されたようだ



1850～1900年から2010～2019年の地球温暖化 (°C)	1850年から2019年までの過去の累積CO ₂ 排出量 (GtCO ₂)
1.07 (0.8-1.3; 可能性のある範囲)	2390 (±240; 可能性のある範囲)

1850-1900年 気温上限までの およその地球 温暖化 (℃)	2010～2019年 気温上限までの 追加的な 地球温暖化 (℃)	2020年初頭からの推定残余炭素収支 (GtCO ₂) 地球温暖化を温度上限まで抑制できる可 可能性					非CO ₂ 排出量の削減の分散
		17%	33%	50%	67%	83%	
1.5	0.43	900	650	500	400	300	付随する非CO ₂ 排出量の増減 により、左側の値が 220GtCO ₂ 以上、増加または 減少する可能性がある
1.7	0.63	1450	1050	850	700	550	
2.0	0.93	2300	1700	1350	1150	900	

どう読むの？



下の表は？



過去のCO₂排出量と残余炭素収支の推定だよ

2020年に指定した「残りの炭素収支」ね



表の左2列は、人間が引き起こした世界の平均気温の上昇を示しており、各年の気温に対する自然変動の影響は除外されているんだ



右の1列は、非CO₂排出が温暖化に影響している場合に220GtCO₂程度考慮する必要があることをコメントしているね



推定残存炭素収支は、2020年初頭からの計算で、世界のCO₂排出量がネットゼロに達するまでの数値を示しているよ

もうちょっと詳しく教えて



ここに記載した可能性は、累積CO₂排出量に対する一時的気候応答 (TCRE) と地球システムの追加的なフィードバックの不確実性に基づいて、温暖化が左記の2列に示した気温水準を超えない確率を示しているんだ

産業革命前からの気温上昇の目標水準を1.5℃・1.7℃・2.0℃とすると、2020年初頭を起点に、今後排出が許されるCO₂量(残余炭素収支)は、TCREが50%値の場合、それぞれ500・850・1350GtCO₂と評価されるのね



83%値なら、300・550・900GtCO₂と小さくなるわこれらの値は、CO₂以外の温暖化物質の削減がどれだけうまく進むかによっても影響を受けて、±220GtCO₂の範囲で増減するのね





急にどうしたんだい？

計算では1850～2019年の間の人間活動による
積算排出量 $2390 \pm 240 \text{GtCO}_2$ が使われているわ



そう。上の表だね



過去の温暖化に関する不確実性($\pm 550 \text{GtCO}_2$)と
非 CO_2 排出量の強制力とそれに伴う応答に関する
不確実性($\pm 220 \text{GtCO}_2$)は、TCREの不確実性の評価
によって部分的に処理されているんだ



だけど、2015年以降の最近の排出量の不確実性
($\pm 20 \text{GtCO}_2$)とネットゼロの CO_2 排出量を達成した
後の気候応答の不確実性($\pm 420 \text{GtCO}_2$)は処理され
ていないんだ

つぎは？

A small, stylized owl icon with large eyes and a colorful beak, positioned to the left of the text block.

人為的な二酸化炭素除去(CDR)は、大気中から CO_2 を除去し、貯蔵庫に持続的に貯蔵する潜在的可能性がある。CDRの目的は、残存する排出量を相殺することで CO_2 や GHG 排出をネットゼロにすること、あるいは、人為的除去が人為的排出を上回る場合、気温を下げることにあるんだ

CDRは、carbon dioxide removalの略でしょ

A small, stylized owl icon with large eyes and a colorful beak, positioned to the left of the text block.

CDR技術には、生物学的循環や気候に広範囲にわたり影響を与える可能性があり、このことで CO_2 を除去し温暖化を抑制するこれらの技術の潜在的可能性を弱めたり強めたりするほか、水の利用可能性や水質、食料生産や生物多様性にも影響を与えるんだ

それから？



人為的な二酸化炭素除去(CDR)が世界全体の正味負の排出になると、大気中のCO₂濃度が低下し、海面表層部における酸性化が逆転するだろう

それで？



人為的なCO₂の除去及び排出は、陸と海の炭素貯蔵庫との間で、CO₂をそれぞれ放出・吸収することにより部分的に相殺されるんだ

CDRは、同じ規模の人為的な排出による増加分とほぼ同じ量だけ、大気中のCO₂を減らすだろう。CDRの総量によっては、人為的なCO₂除去による大気中のCO₂減少量が、同量のCO₂排出による大気中のCO₂増加量よりも最大で10%少なくなるだろう

技術力で削減するのね



世界全体でCO₂の正味負の排出が達成され、持続した場合、CO₂による世界平均気温の上昇は徐々に下がっていくが、その他の気候変動は数十年から数千年の間、現在の傾向が続くだろう



例えば？



CO₂排出量が大幅に正味負となった場合でも、世界の平均海面水位が下がるには数世紀から数千年かかるだろう



海拔が低いところは大変ね



5つの例示のシナリオでは、大気汚染の原因にもなる、CH₄・エアロゾル及びオゾン物質の排出量が同時に変化すると、短期的・長期的に正味の世界平均気温は上がってしまう



各シナリオの予測は？



長期的には、大気汚染対策と強力かつ持続的なCH₄排出量削減の組み合わせを想定したシナリオでは、この正味の温暖化はより小さくなるよ



GHG排出が少ない及び非常に少ないシナリオでは、人為的なエアロゾル排出の削減を仮定すると正味の温暖化をもたらす一方、CH₄やその他のオゾン物質の排出の削減は寒冷化に繋がるよ



CH₄とエアロゾルはともに短命のため、これらの気候影響は部分的に相殺され、CH₄排出の削減は世界全体の地上オゾンを減少させることで大気質の改善にも寄与するよ

いいわね～



温暖化を抑えられそうね～



C02によって引き起こされる世界的な気温上昇を安定させるためには、人為的CO₂排出量と同除去量の均衡を取りながら、ネットゼロのC02排出量を達成することが条件になるね



これは、人為的GHG排出量と同除去量が排出指標を考慮して加重平均したときに等しくなる場合のネットゼロのGHG排出の達成とは意味が違うんだ



どういうこと？



特定のGHG排出経路について、個々の温室効果ガスの経路がその結果の気候応答を決定するけど、様々なGHG排出量と除去量のうちどの排出指標を選択するかにより集約された温室効果ガス排出がどの時点でネットゼロになるかに影響するんだ





温暖化係数100年単位で定義されるネットゼロGHG排出量達成後、それを維持する排出経路は、気温がより早期にピークに達した後で低下するらしい

は～い



GHG排出が非常に少ない又は少ないシナリオ($SSP_{1-1.9}$ ・ $SSP_{1-2.6}$)は、GHG排出が多い又は非常に多いシナリオ($SSP_{3-7.0}$ ・ $SSP_{5-8.5}$)と比べて、温室効果ガスとエアロゾルの濃度及び大気質に、数年以内に識別可能な効果をもたらすだろう



これらの対照的なシナリオ間の識別可能な違いは、世界平均気温の変化の傾向について約20年以内に、その他の多くの気候的な影響要因についてはより長い期間の後に、自然変動の幅を超え始めるだろう



COVID-19流行抑制対策に伴う2020年の排出削減は、大気汚染に対して一時的ではあるが検出可能な影響をもたらし、それに伴い、人間活動により生じるエアロゾルの冷却効果が弱まる原因として、合計放射強制力を一時的に僅かに強めただろう

経済活動があまりできなかったからよね



しかし、この一時的な強制力に対する世界及び地域的な気候応答は、自然変動の幅を超える変化として検出できなかったようだ



大気中のCO₂濃度は2020年においても上昇を続けており、CO₂増加率の減少は検出できていないんだ

数値が出てたら企業に削減活動を呼びかけやすかったのになあ



GHG排出の削減は大気質の改善にも繋がる。

ただし、短期的には、GHG排出量が少ない・非常に少ないシナリオ(SSP_{1-2.6}・SSP_{1-1.9})のようにGHGを強力的に削減するシナリオでさえも、これらの大気質の改善は、多くの汚染地域で世界保健機構が特定した大気質ガイドラインの基準を満たすには十分じゃないね

大気汚染物質の排出量の削減目標を含むシナリオでは、GHG排出のみを削減する場合と比べ、大気質の改善が数年以内の範囲で更に早まるけど、2040年以降は、大気汚染物質及びGHG排出量を削減する努力を組み合わせたシナリオで、より一層の改善が期待され、その便益の大きさは地域によって異なるね

時間がかかるわね～





GHG排出が非常に少ない又は少ないシナリオ ($SSP_{1-1.9} \cdot SSP_{1-2.6}$) では、GHG排出が多い又は非常に多いシナリオ ($SSP_{3-7.0} \cdot SSP_{5-8.5}$) と比べ、人為的な気候変動の抑制への影響は急速かつ持続的であろうが、初期においては気候システムの応答は自然変動により緩和されるよ



世界平均気温については、GHG排出が非常に少ないシナリオ ($SSP_{1-1.9}$) では、GHG排出が多い又は非常に多いシナリオ ($SSP_{3-7.0} \cdot SSP_{5-8.5}$) と比較して、初期に20年変化の動きに違いが現れる可能性が高いんじゃないかな



他の多くの気候要素の応答については、21世紀後半の異なった時期に自然変動の幅を超えて現れてくるだろう

そうなのね～





GHG排出が非常に少ない及び少ないシナリオ ($SSP_{1-1.9}$ ・ $SSP_{1-2.6}$) では、GHG排出が多い及び非常に多いシナリオ ($SSP_{3-7.0}$ ・ $SSP_{5-8.5}$) と比べ、2040年以降の様々な気候的な影響要因の変化はかなり小さいだろう



今世紀の終わりまでには、GHG排出が非常に少ない及び少ないシナリオでは、それよりもGHG排出が多いシナリオと比べ、極端な海面水位の頻度の増大、強い降水及び降水による洪水並びに危険な暑熱の閾値の超過など、いくつかの気候的な影響要因の変化は大幅に小さくなり、同時に、そのような超過が発生する地域の数も少なくなるだろう



これらの変化は、排出が非常に少ないシナリオは排出が少ないシナリオよりも、GHG排出が中程度のシナリオ ($SSP_{2-4.5}$) は排出量が多い又は非常に多いシナリオよりも、それぞれ同様に小さいだろう

おしまい

