

2022年5月7日

「気候変動と地球温暖化」講演会
伏見区京都府総合教育センター

地球の気候はどう変化してきたか？ 21世紀末にはどうなるか？

IPCC(気候変動に関する政府間パネル)第6次報告書(2021)を中心に

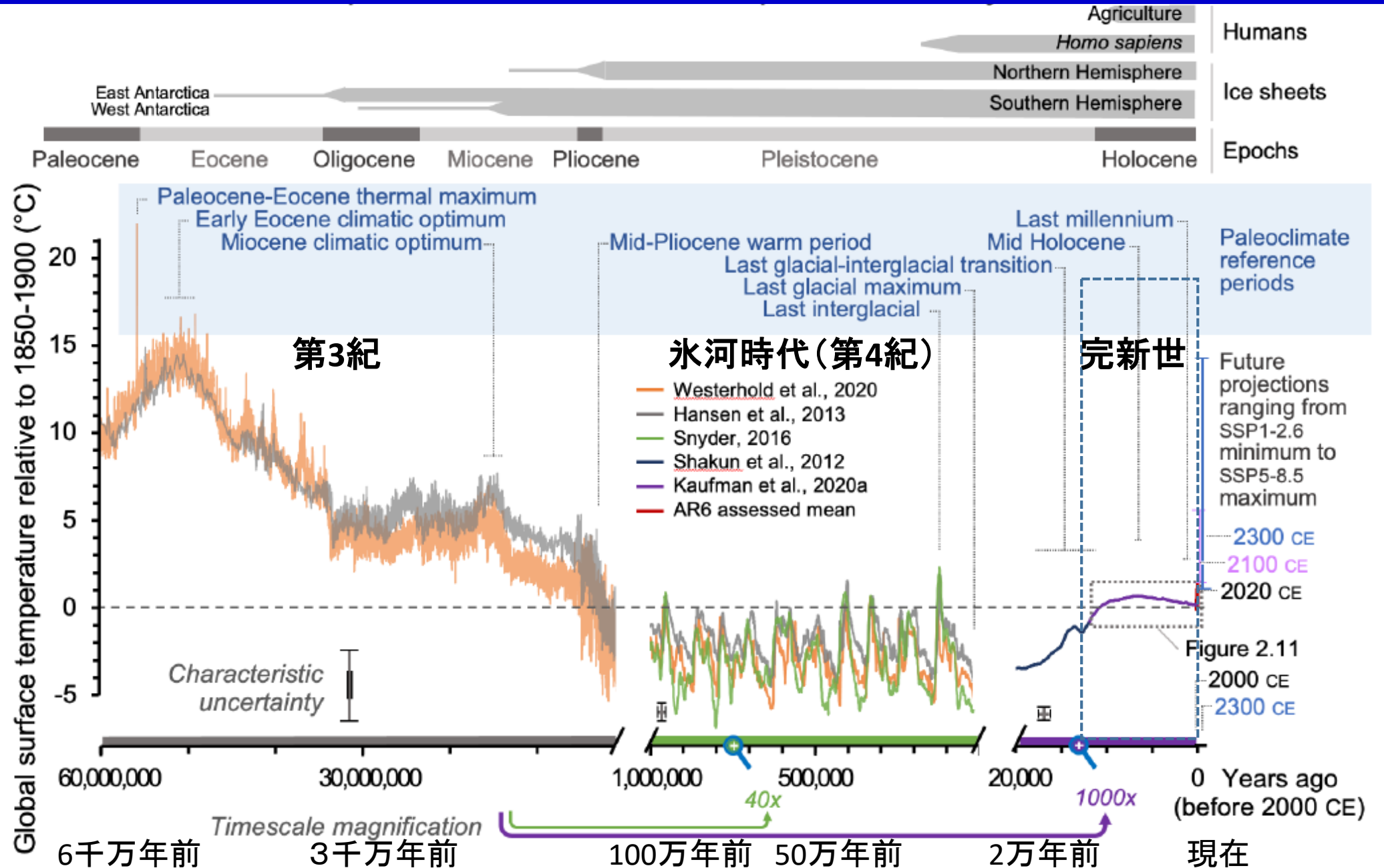
安成 哲三

総合地球環境学研究所 顧問・名誉教授

京都気候変動適応センター長

地球の気候はどう変化してきたか？

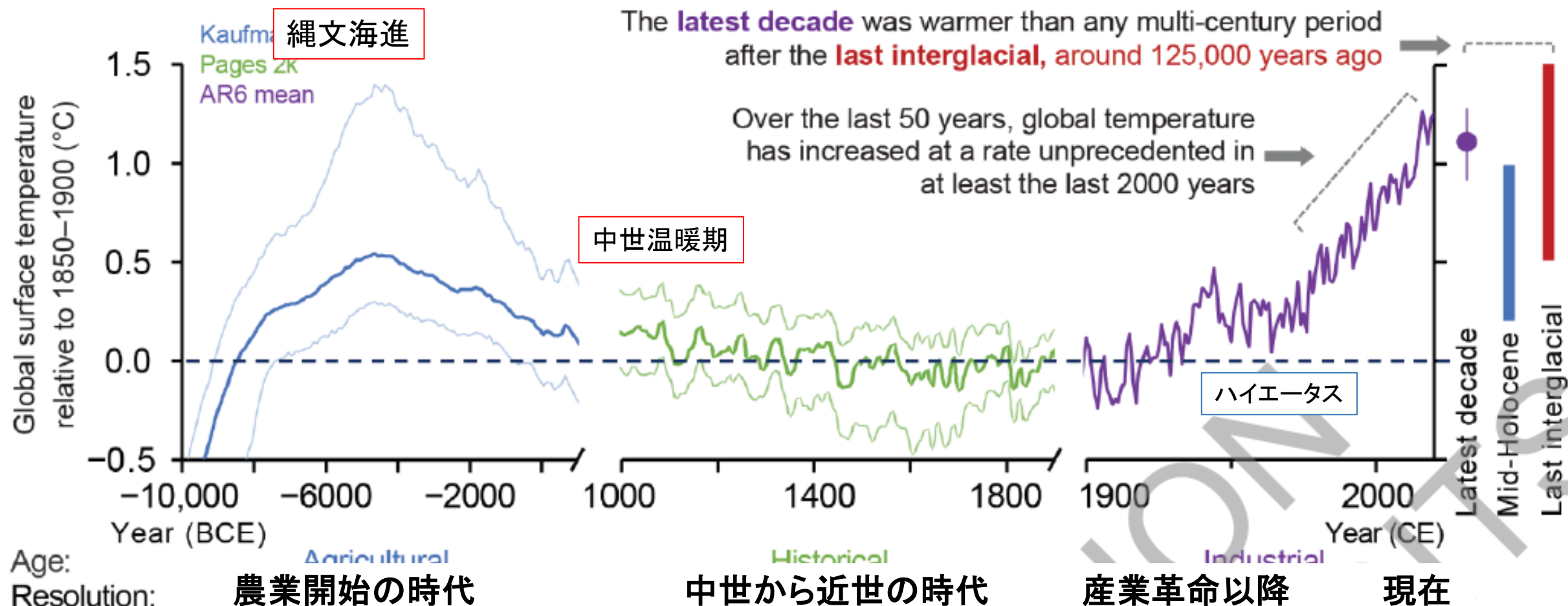
過去6千万年(新生代)における地球表面の気温の変化



過去125,000年における地球表面気温の変化

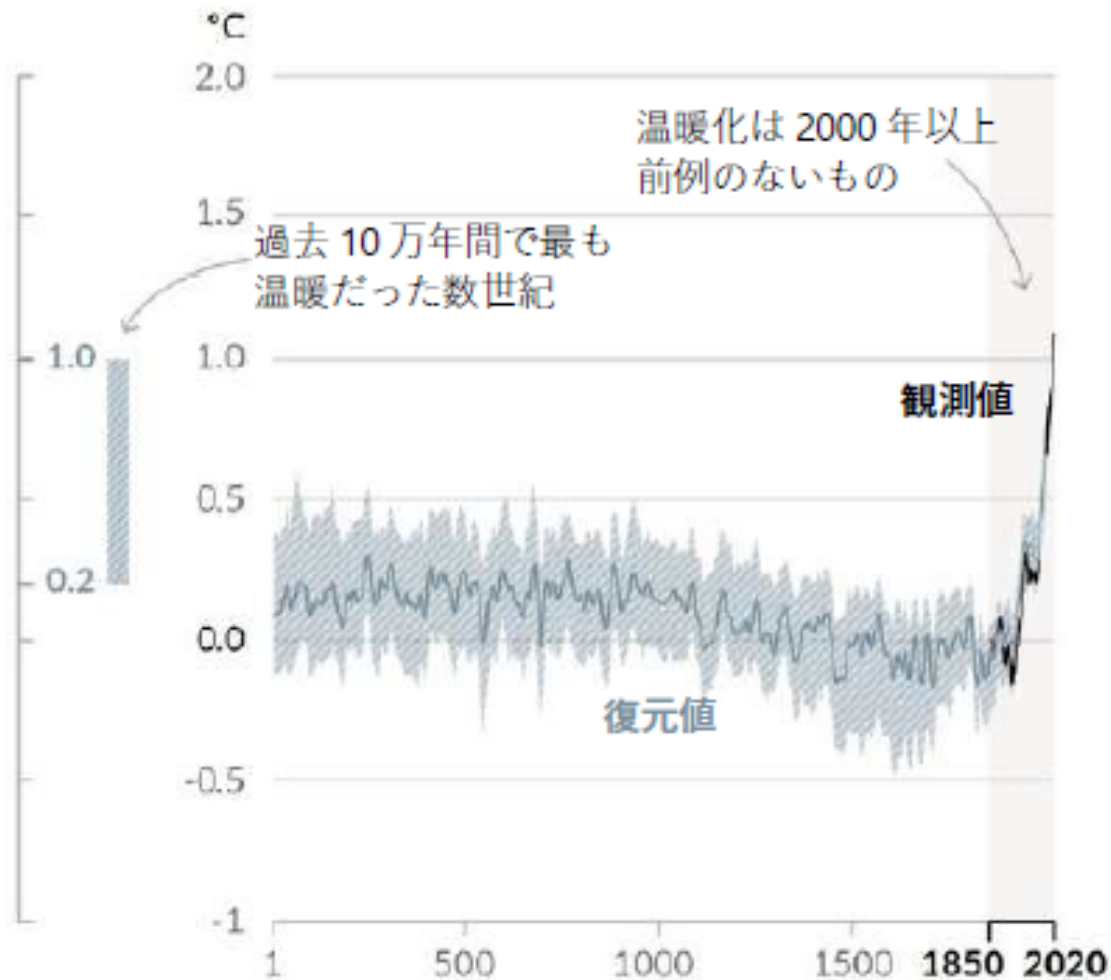
IPCC-AR6-WG1 Chap.2

(a) Global surface temperatures are more likely than not unprecedented in the past 125,000 years



過去約2000年の世界の気温変化(1850~1900からの偏差)

a) 世界平均気温（10年平均）の変化
復元値（1~2000年）及び観測値（1850~2020年）



b) 世界平均気温（年平均）の変化
観測値並びに人為・自然起源両方の要因を考慮した推定値 及び
自然起源の要因のみを考慮した推定値（いずれも 1850~2020年）

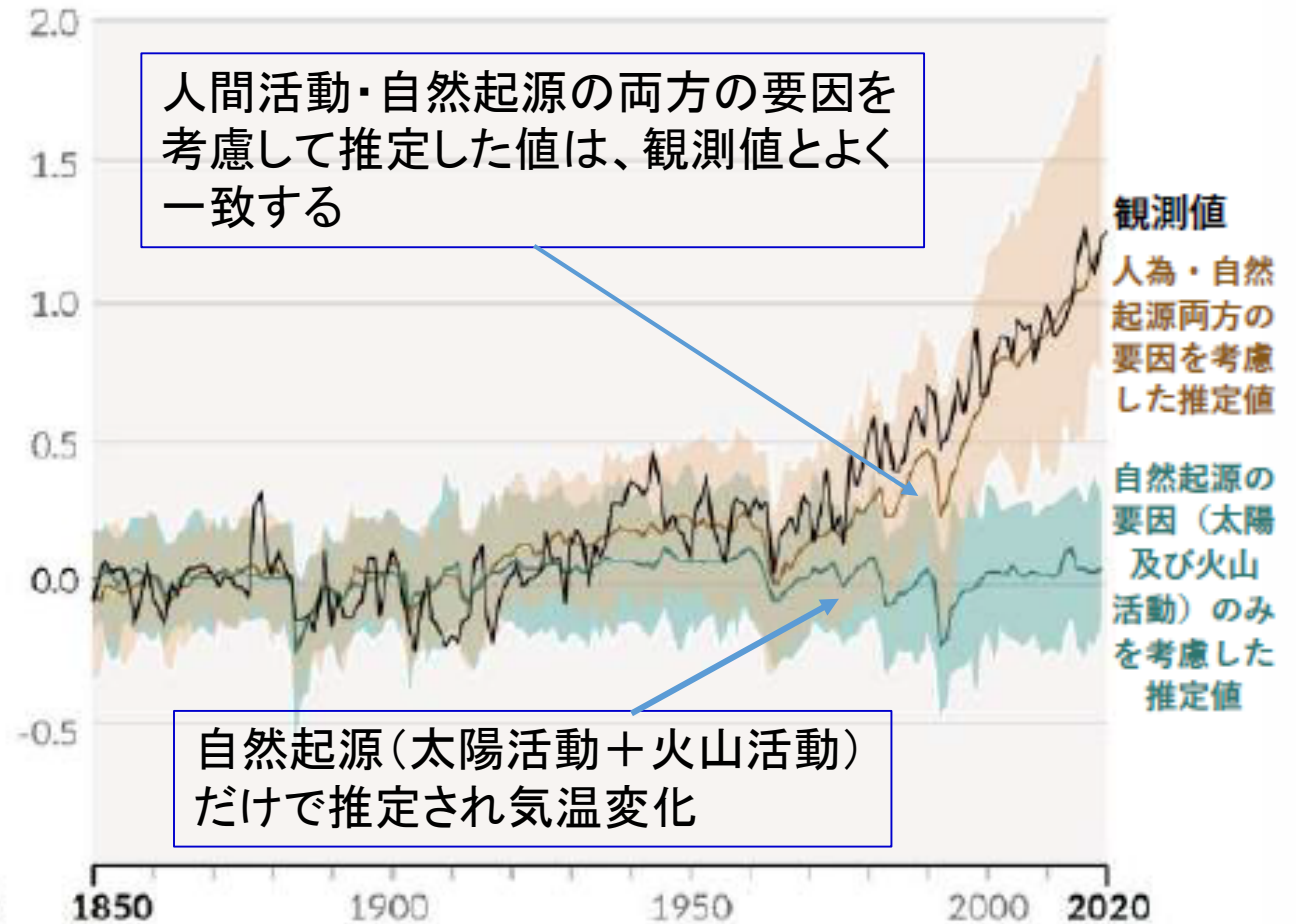
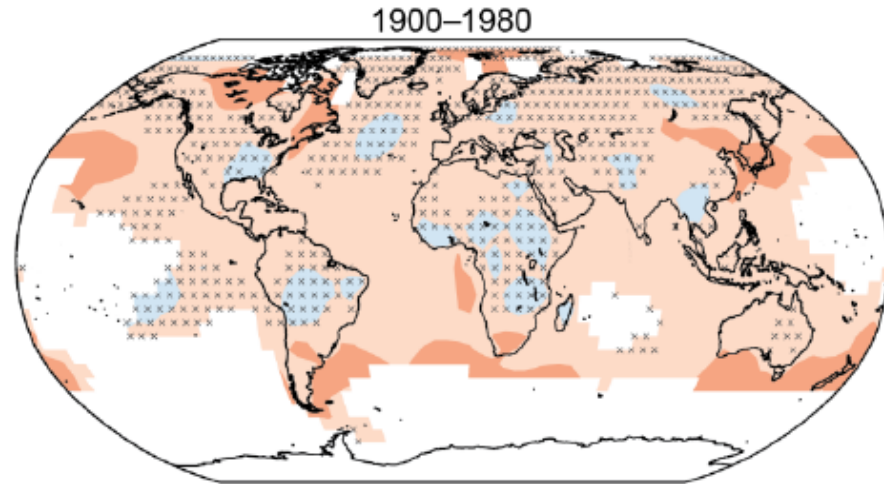


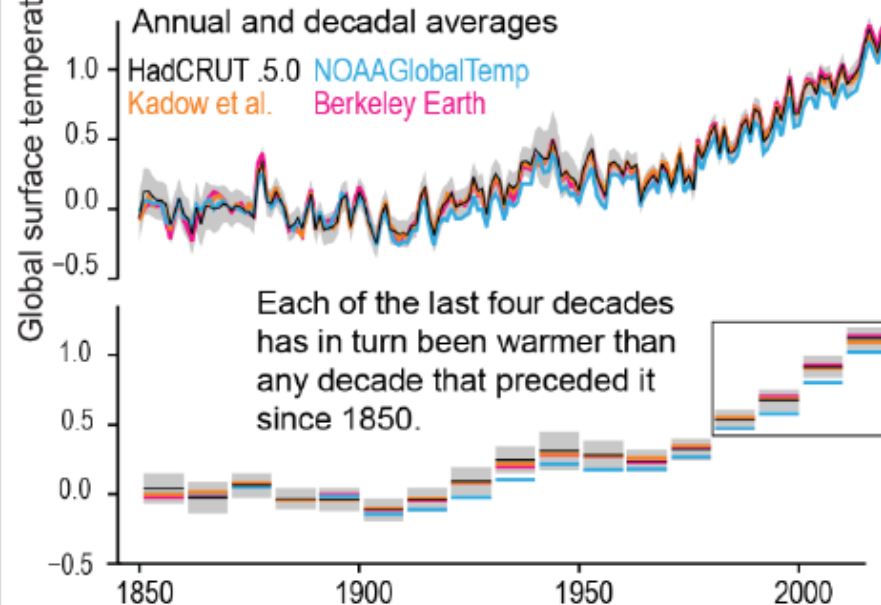
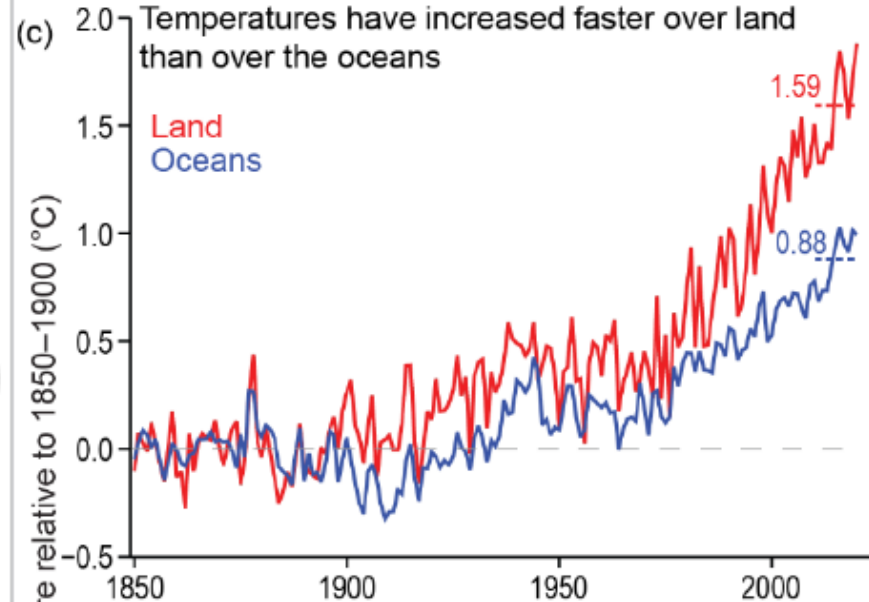
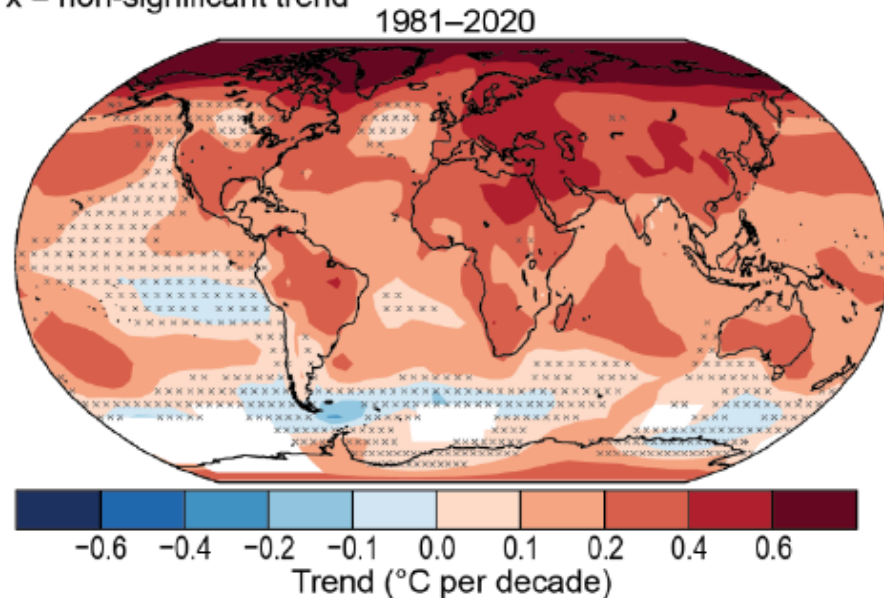
図 SPM.1 : 世界の気温変化の歴史と近年の昇温の原因

地表気温変化の分布と1850年以降の変化

(b) Warming accelerated after the 1970s, but not all regions are warming equally

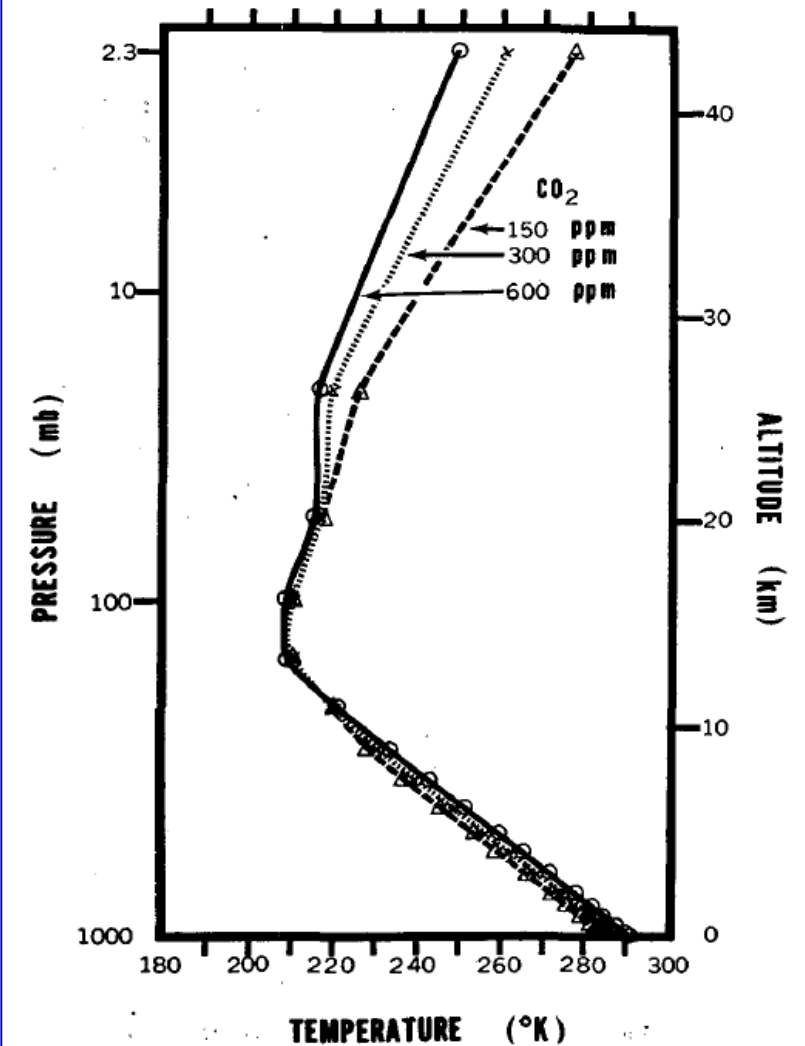
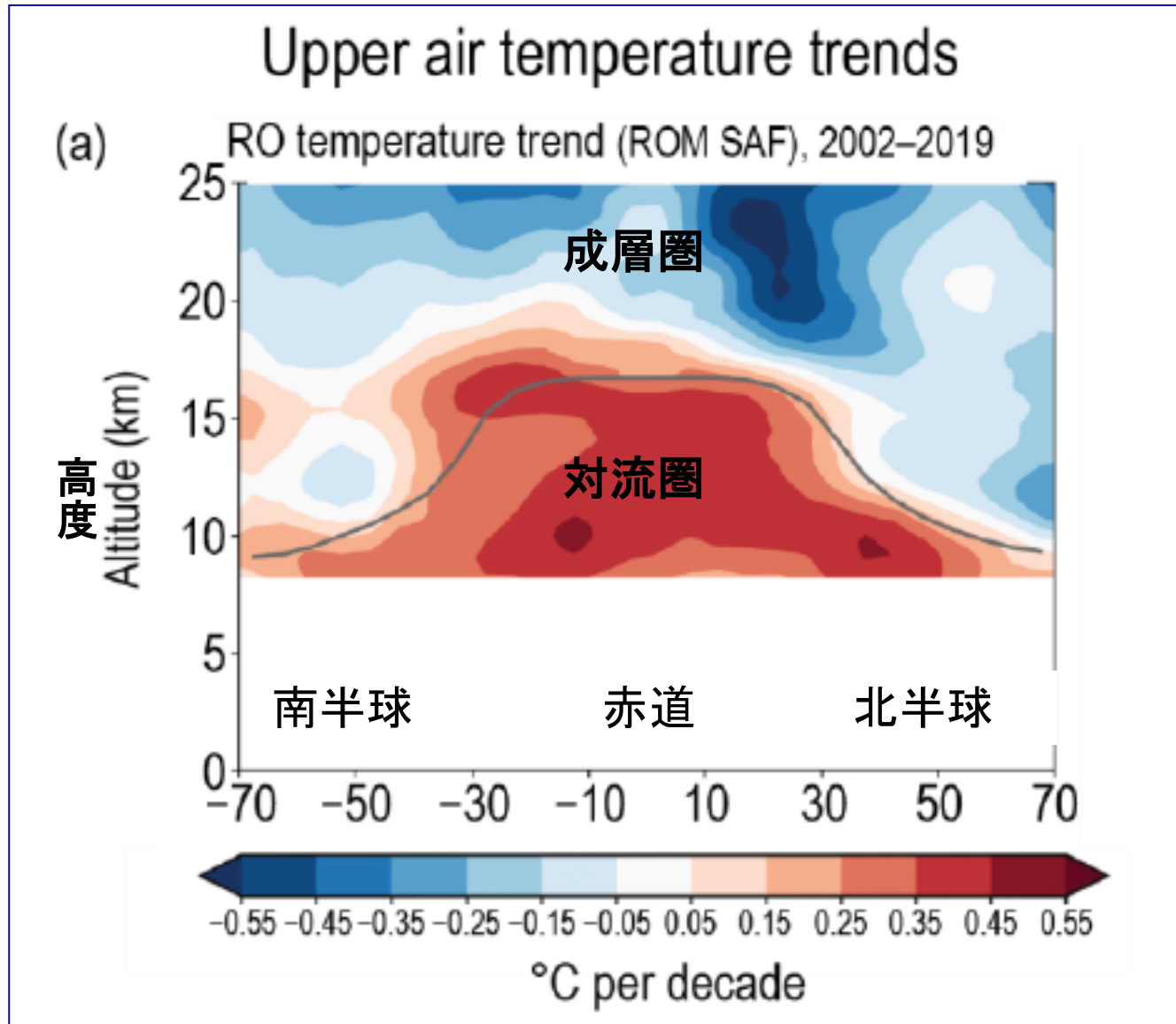


x = non-significant trend



- ・1970年代からの気温上昇が非常に顕著である
- ・陸上での気温上昇が海上よりも顕著である。

大気圏(対流圏+成層圏)における年平均気温の傾向(2002 → 2019)



Manabe and Wetherald (1967) は、CO₂増加により対流圏は気温が上昇し成層圏は低下することを推定していた

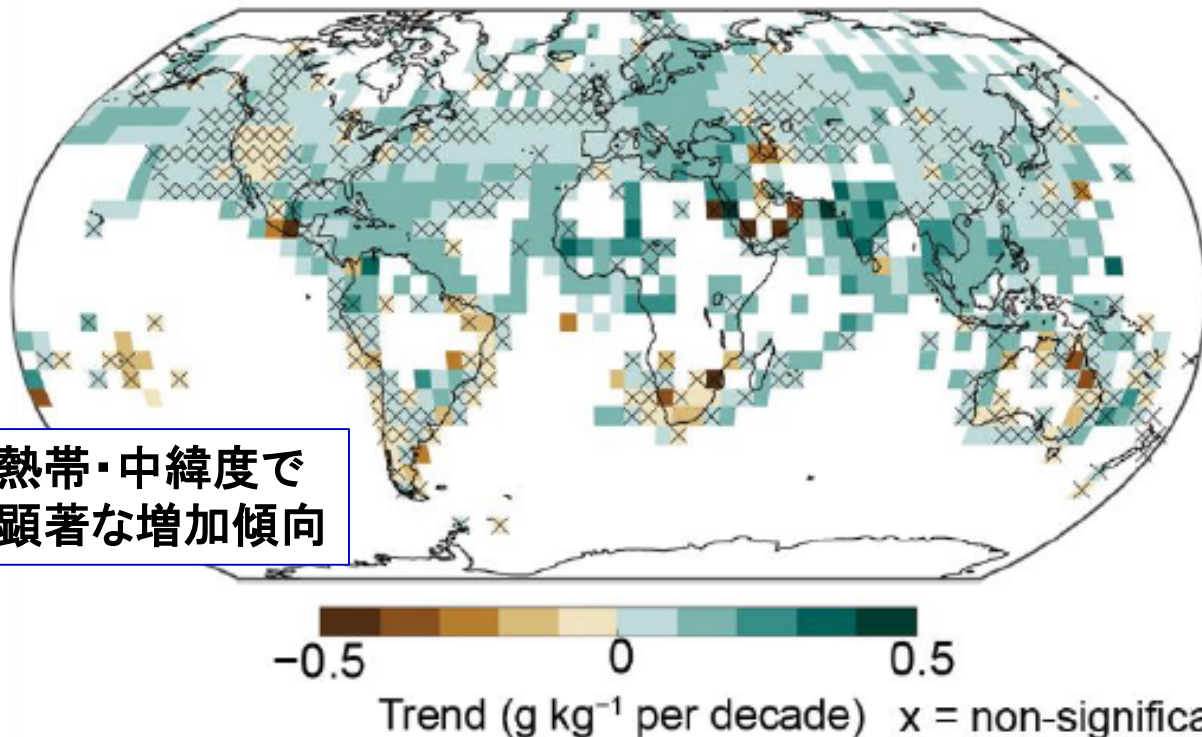
大気の水蒸気量(比湿)は増加している

(a) 比湿の線形トレンド(傾向)

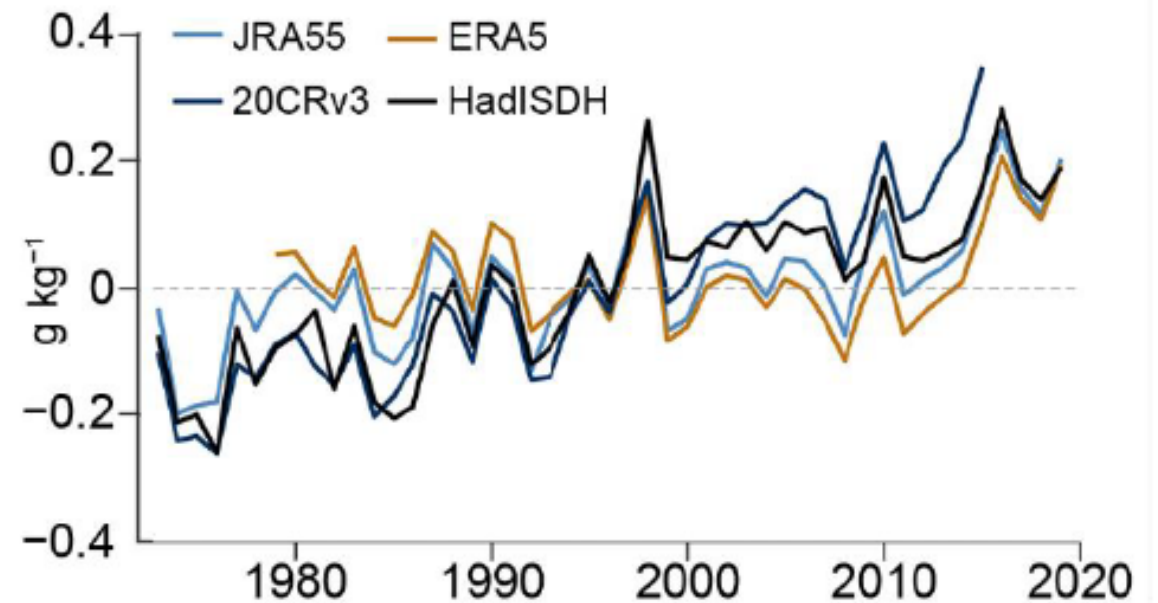
(b) 全球平均の比湿の変化

Changes in Surface Humidity

(a) Trends in surface specific humidity (q)



(b) Global average surface q annual anomalies



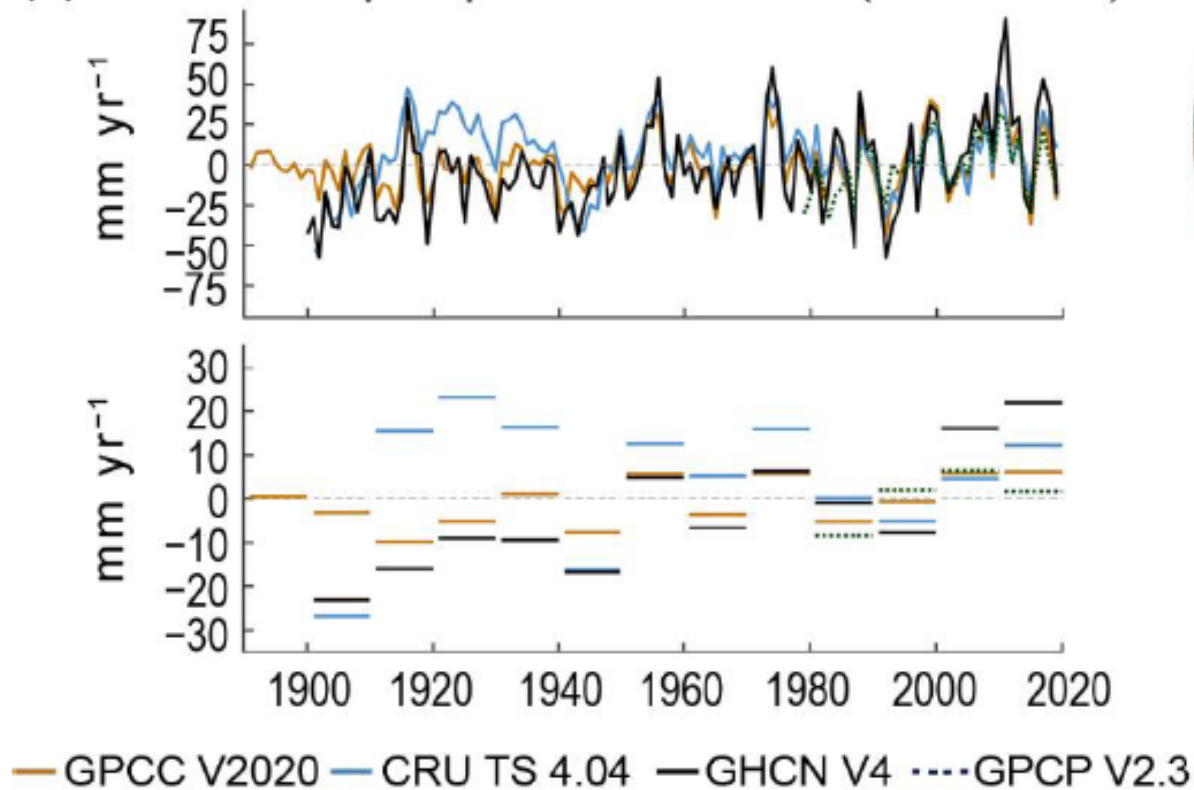
(左) 1900年以降の全陸上での降水量の変動・変化

顕著な増加傾向はない

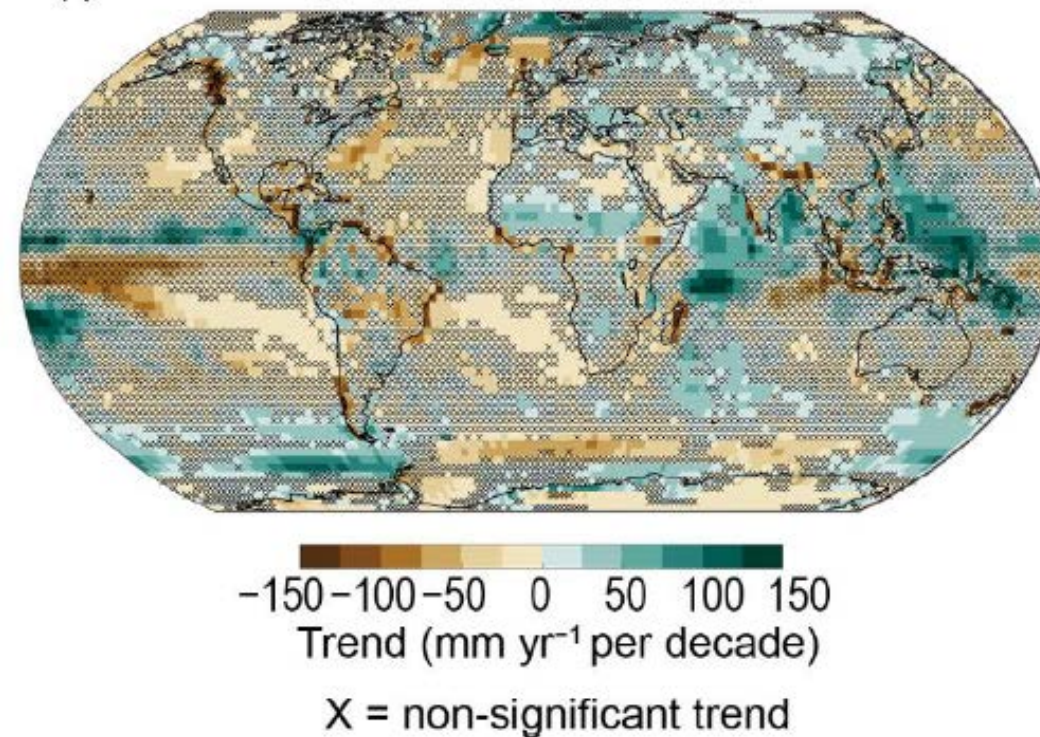
(右) 1980年以降の全球での降水量の変化傾向

熱帯・モンスーン地域を中心に増加傾向が顕著

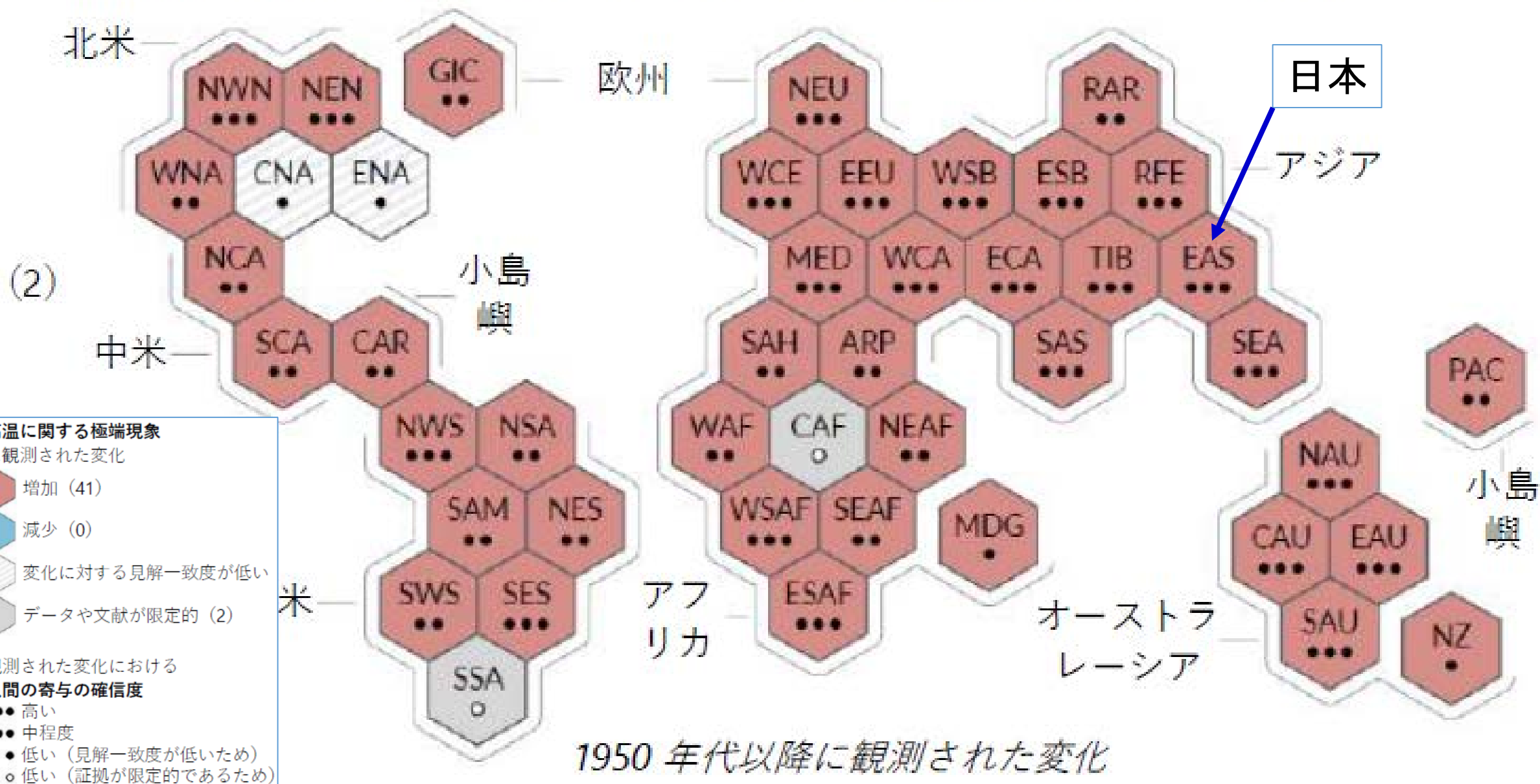
(c) Global land precipitation anomalies (1891–2019)



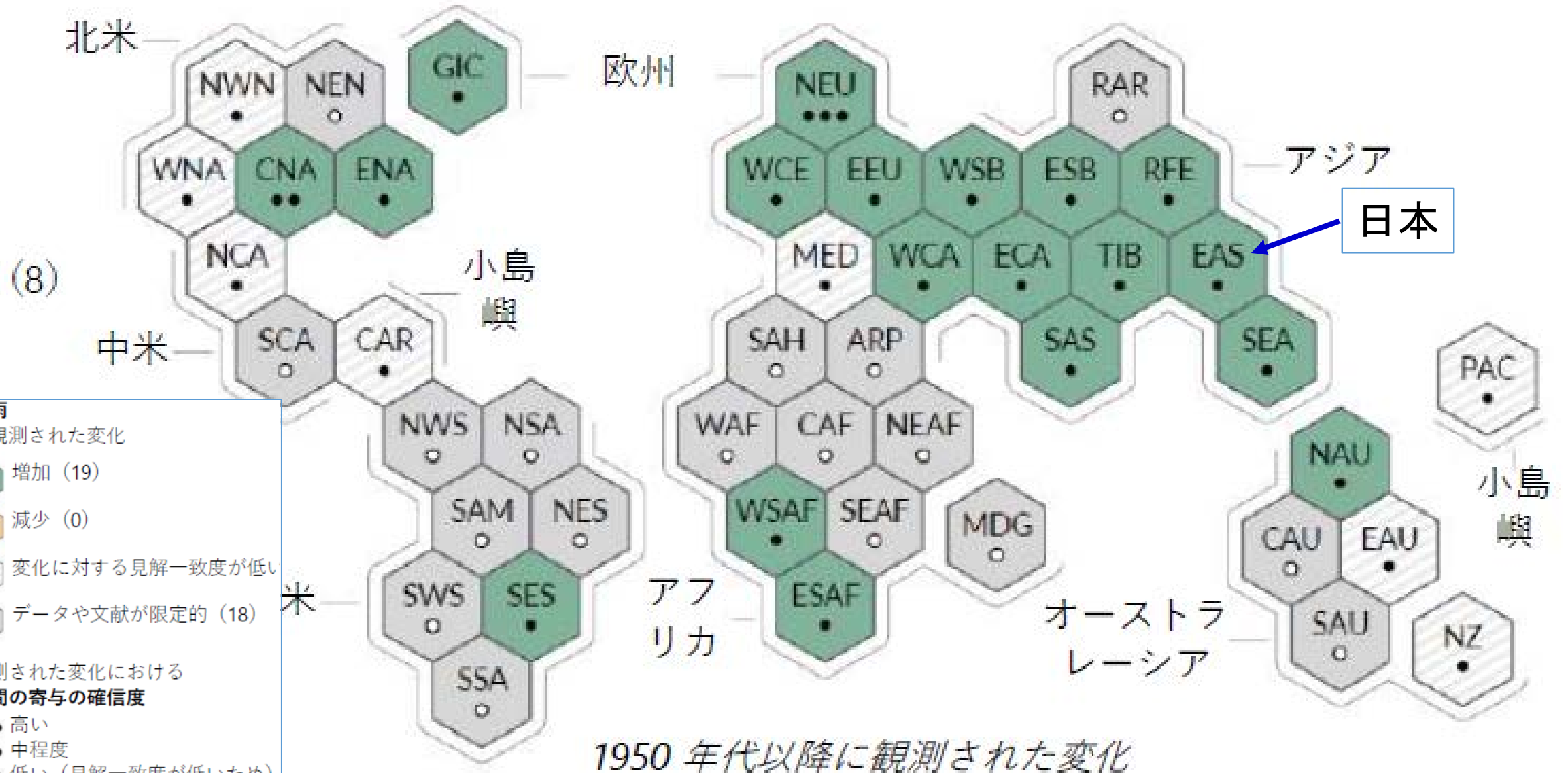
(f) GPCP V2.3 1980–2019



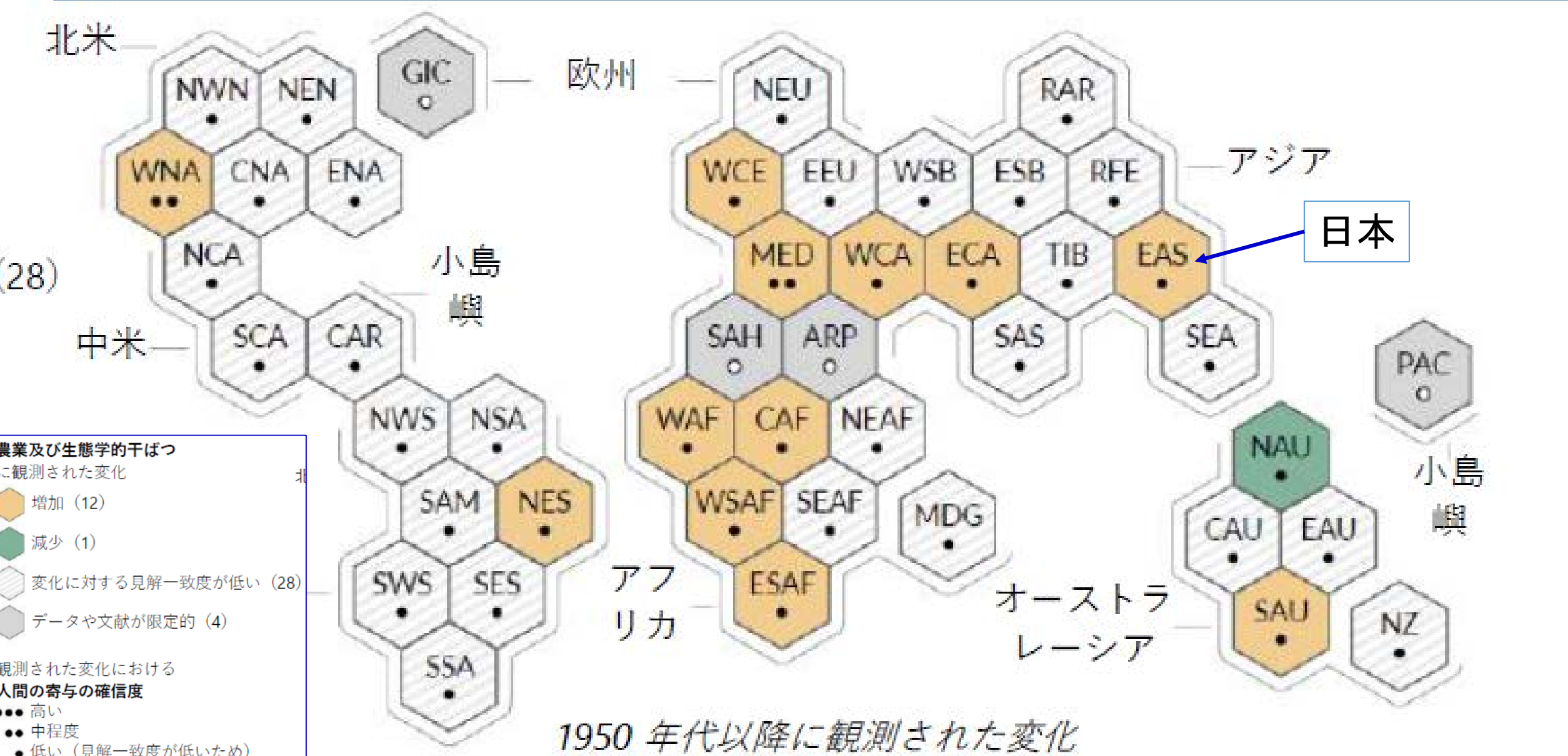
a) 世界中の地域において**高温に関する極端現象**に観測された変化の評価と、
観測された変化における人間の寄与に関する確信度の合成図



b) 世界中の地域において**大雨**に観測された変化の評価と、観測された変化における人間の寄与に関する確信度の合成図

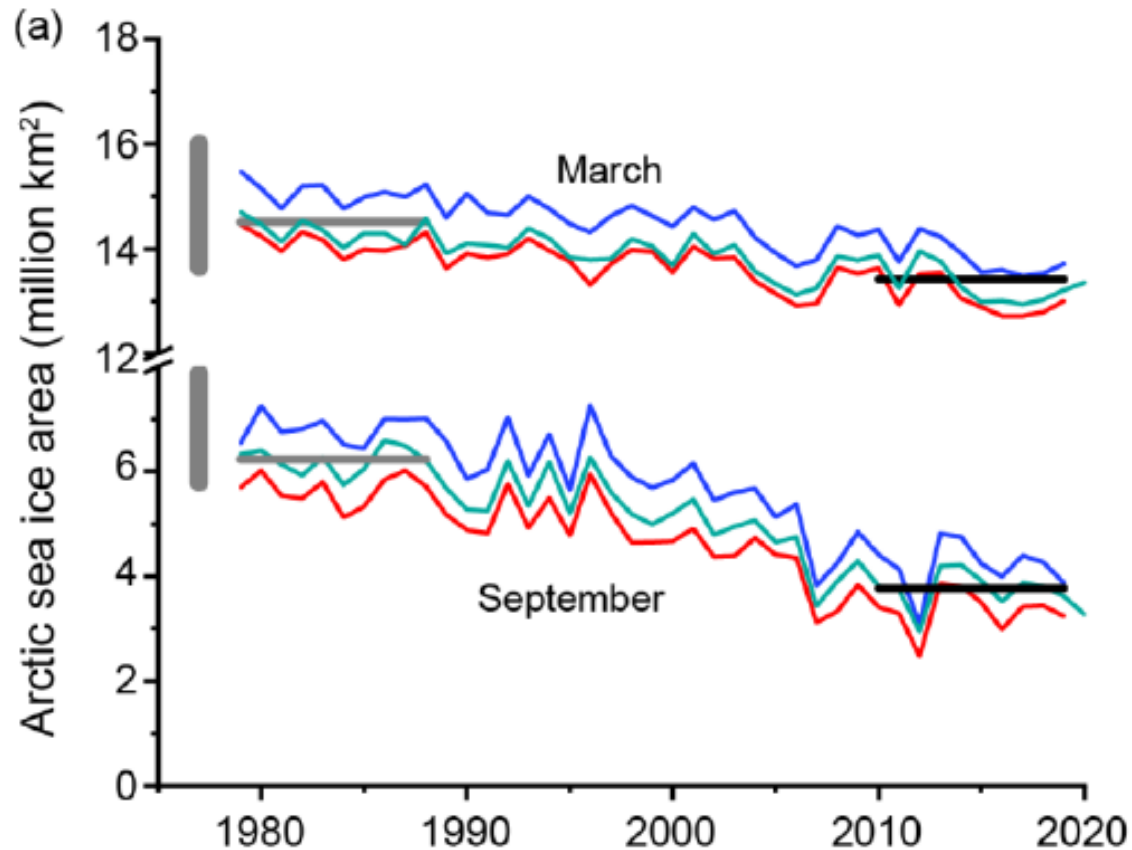


c) 世界中の地域において**農業及び生態学的干ばつ**に観測された変化の評価と
観測された変化における人間の寄与に関する確信度の合成図

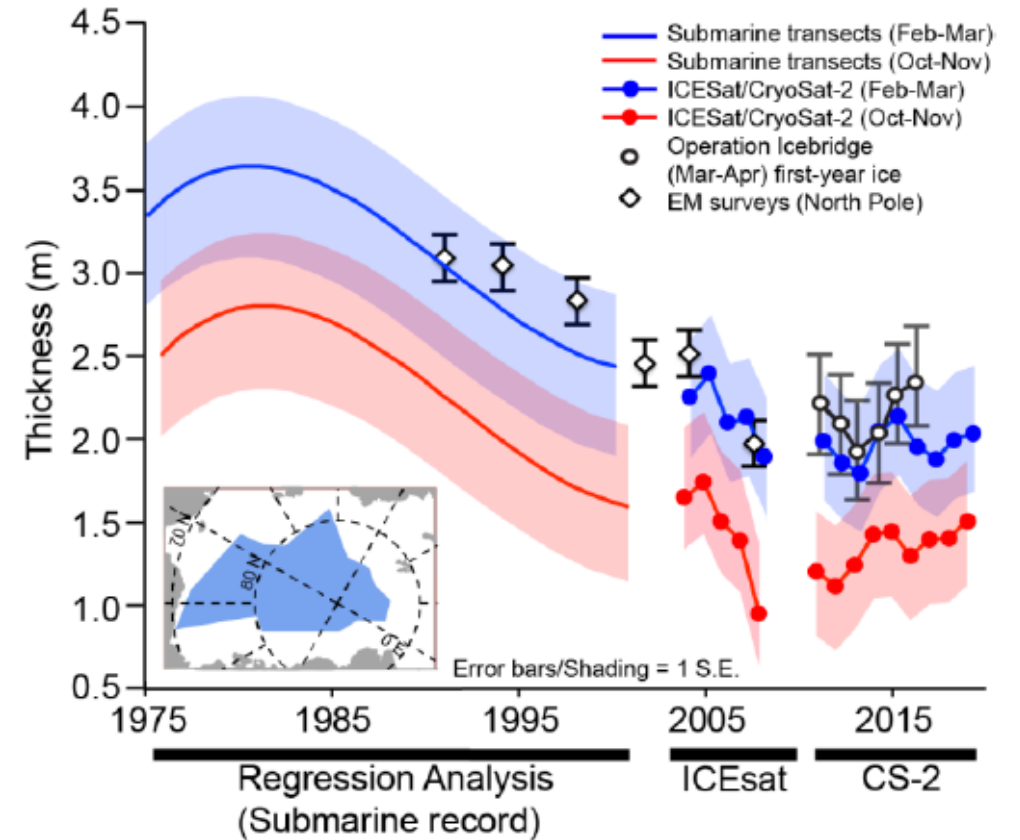


北極海の海氷面積(左)と海氷の厚さの変化(右) (1980~2020)

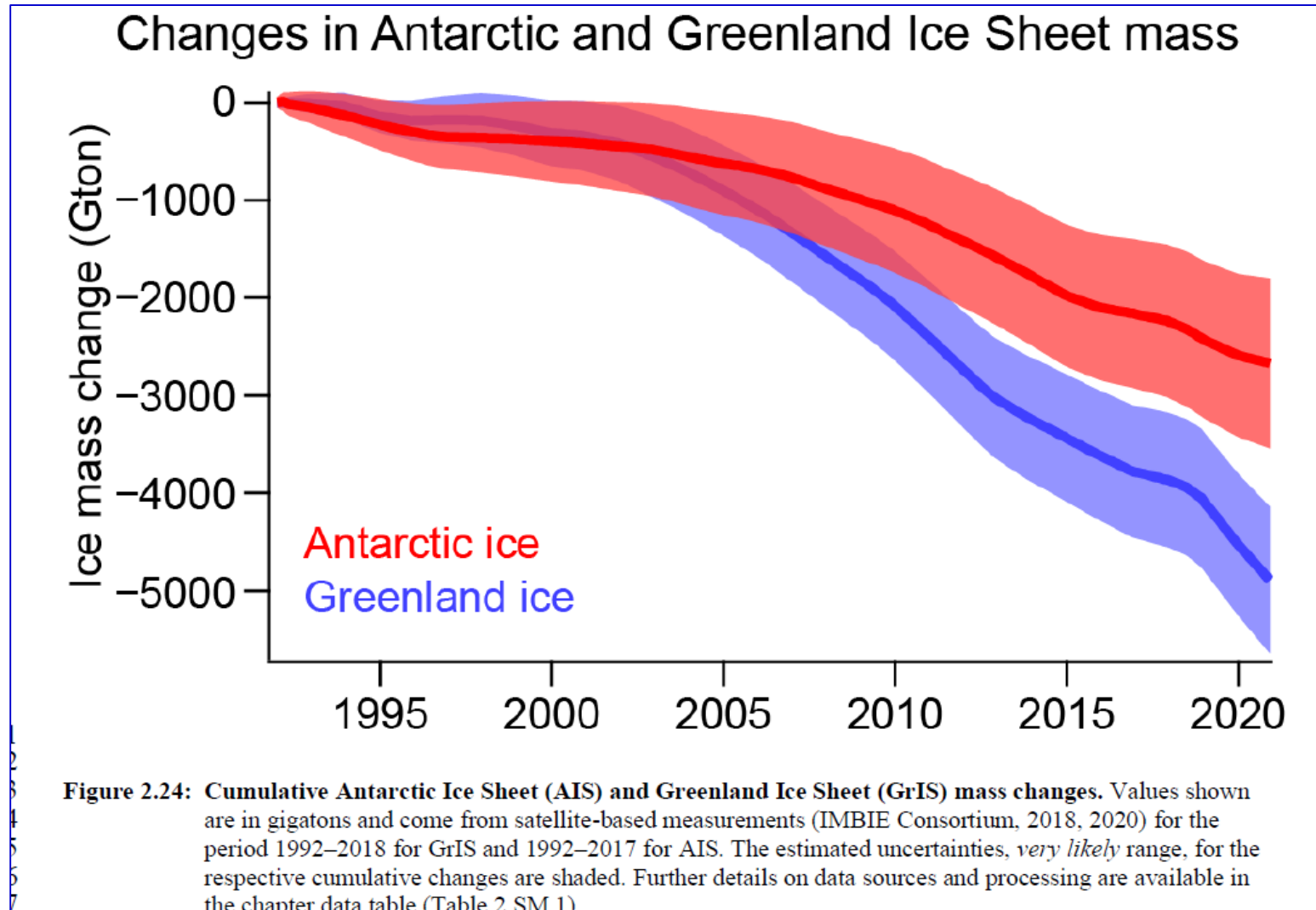
Changes in Arctic and Antarctic sea ice area



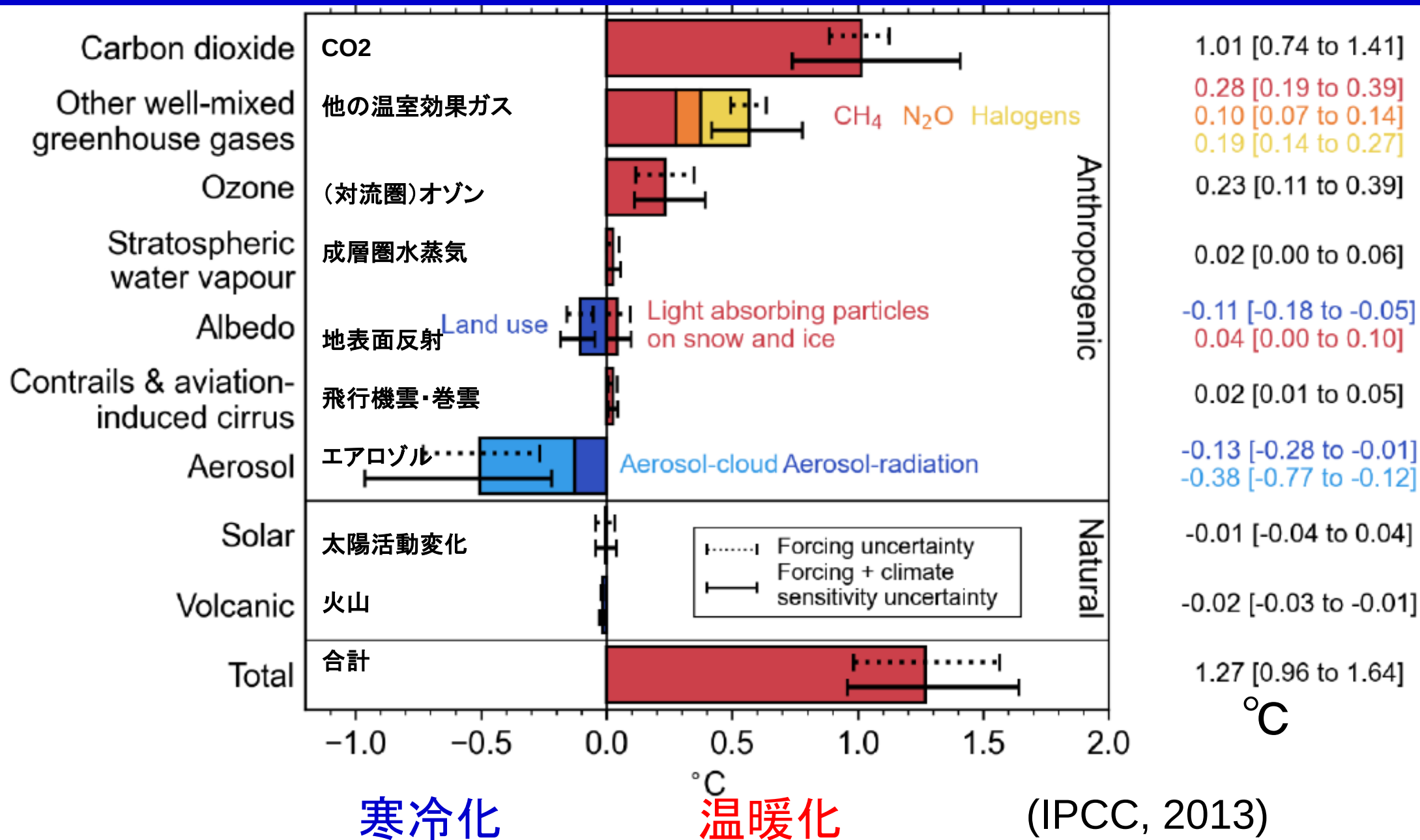
Changes in Arctic sea ice thickness



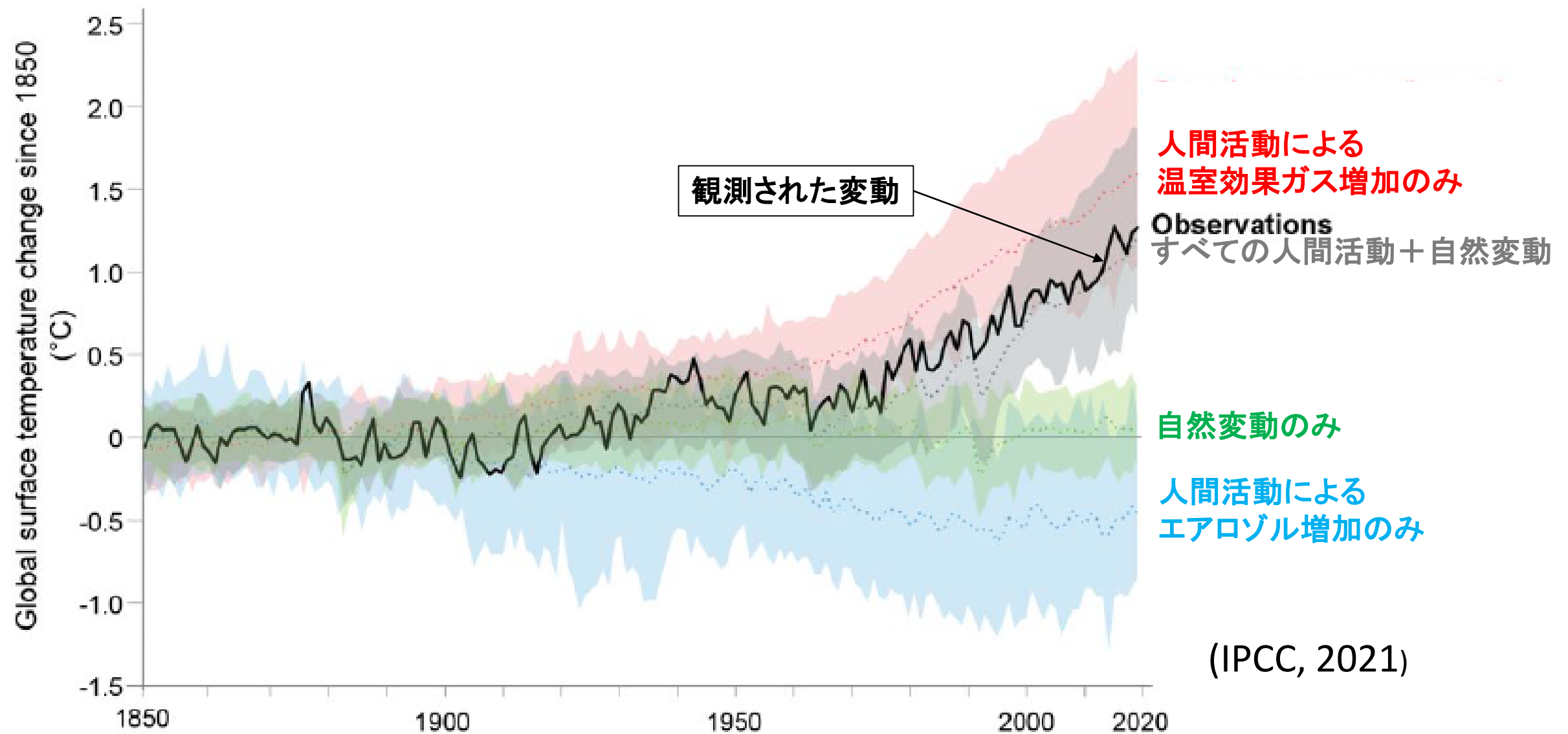
南極とグリーンランド氷床の質量変化 (1990 - 2021)



どの人為・自然的要因が気温変化(1750→2019)をもたらしたか



どのような原因で気温が上昇しているのだろうか？

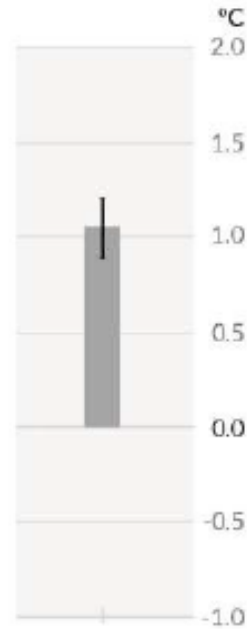


気候の変化(地球温暖化)を引き起こしているのは、
CO₂(温室効果ガス)の増加か？

観測された気温変化にはどのような要因が効いているか

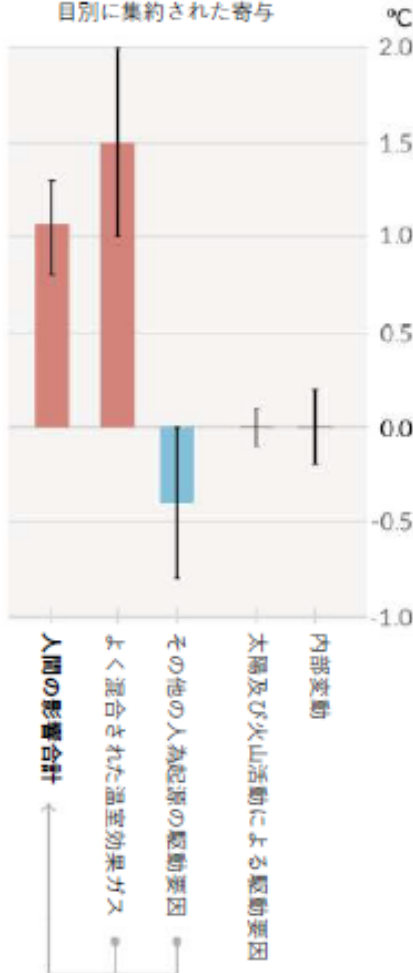
観測された昇温

a) 1850～1900 年を基準とした 2010～2019 年に観測された昇温



2つの補完的なアプローチに基づく昇温への寄与

b) 要因特定の研究から評価された、1850～1900 年を基準とした 2010～2019 年の昇温における項目別に集約された寄与



c) 放射強制力の研究から評価された、1850～1900 年を基準とした 2010～2019 年の昇温における寄与

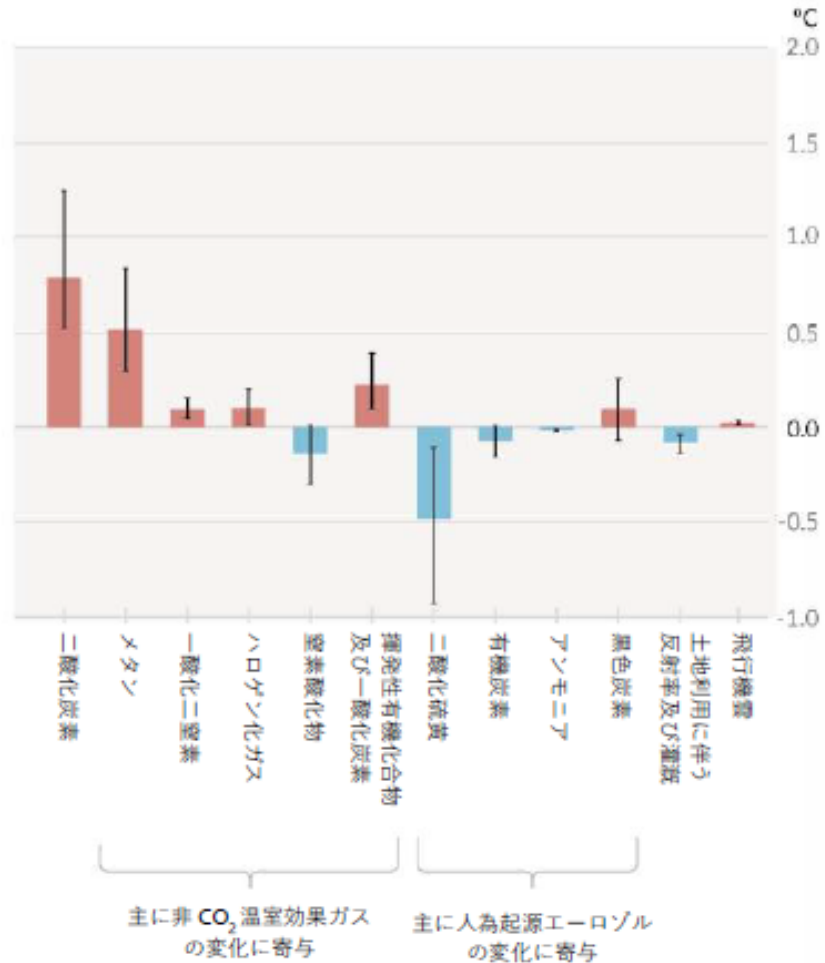
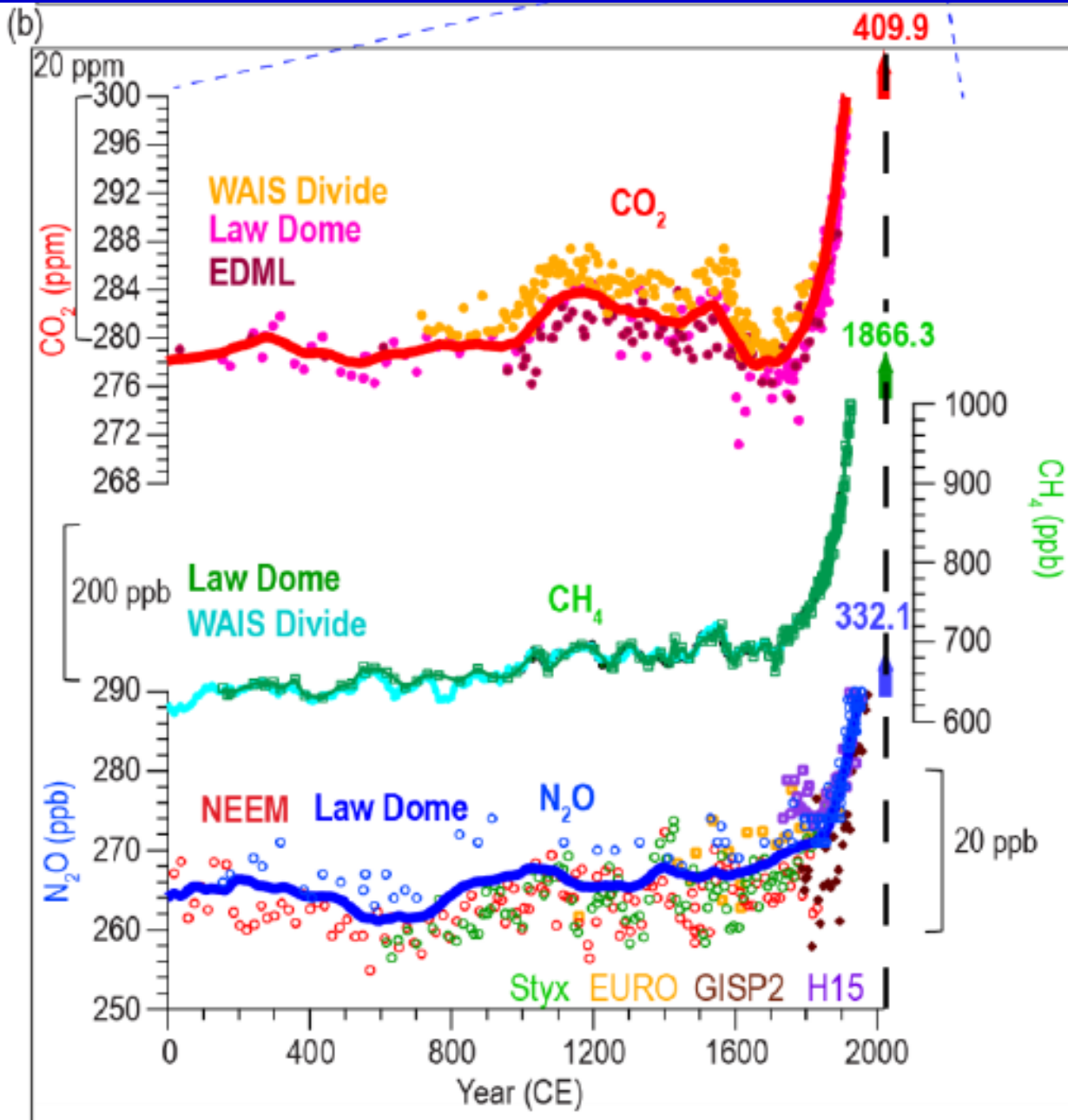


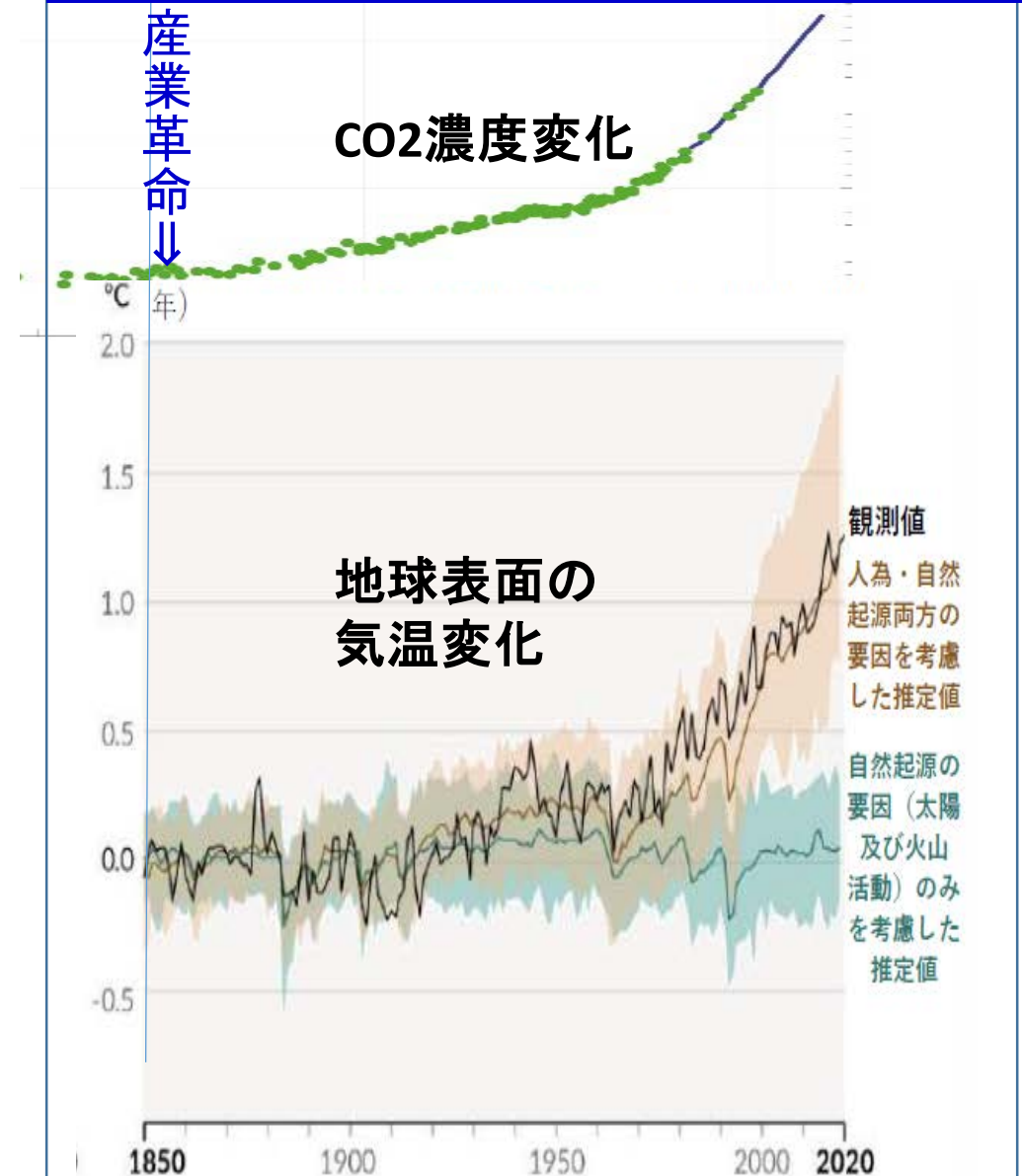
図 SPM.2 : 1850～1900 年を基準とした 2010～2019 年の観測された昇温への寄与の評価

(IPCC, 2021)

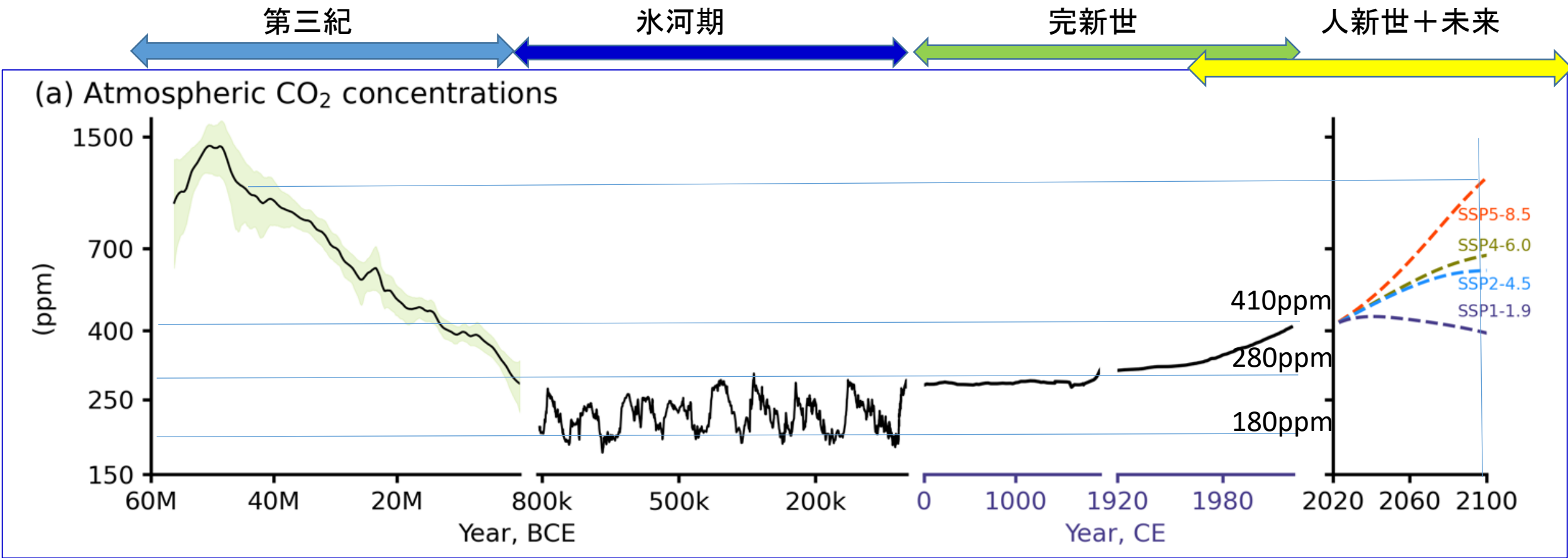
過去2000年における温室効果ガスの変化



1850年以降の大気中のCO₂濃度変化と地球表面の気温変化



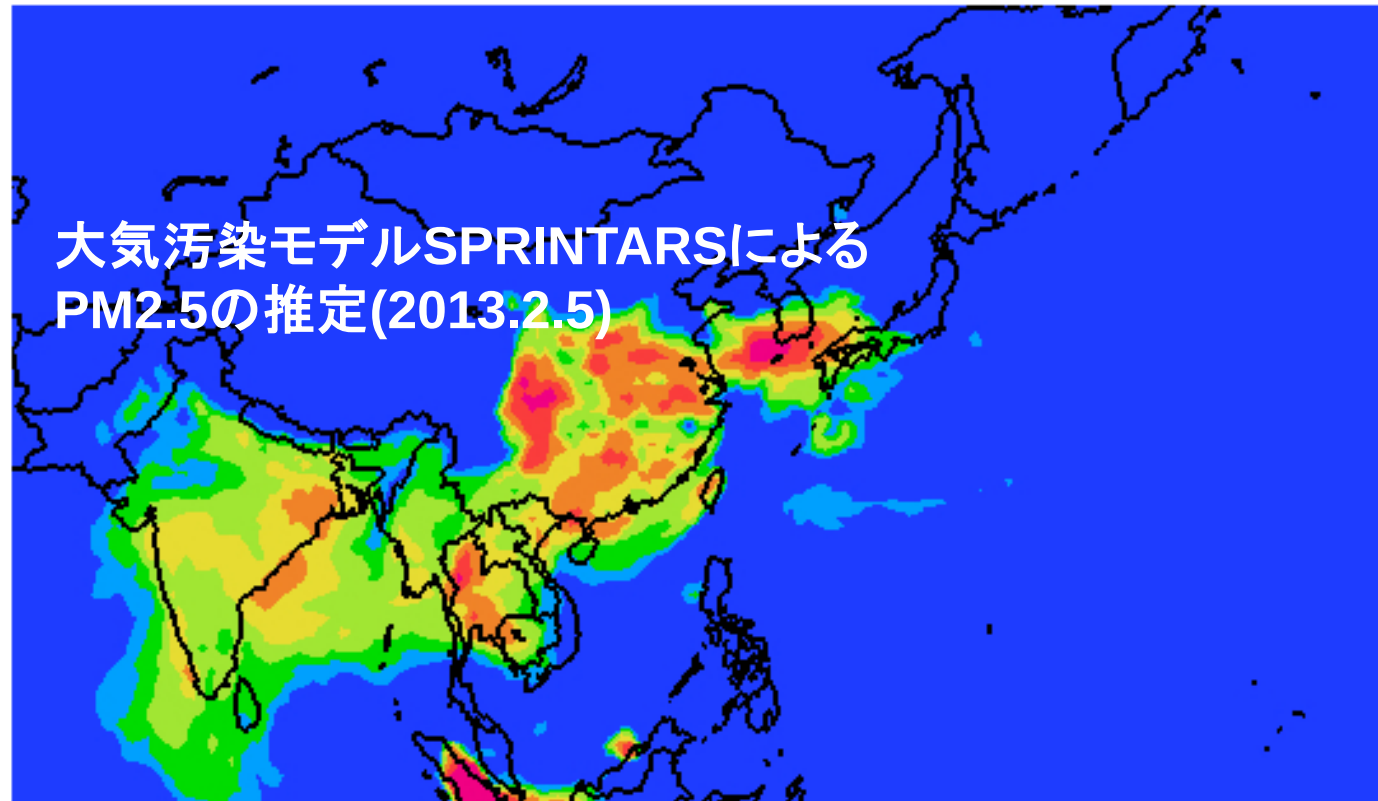
過去6千万年(新生代)における地球大気の二酸化炭素(CO₂)濃度の長期的傾向 (IPCC,2021)



- 2020年のCO₂濃度は過去200万年間のどの時点よりも高い。
- 現在のまま増加するシナリオ(SSP5-8.5)では、2100年には過去6千万年で最も高いレベルに達する可能性。

大気中の汚れ物質(エアロゾル)は気候を変えるもうひとつの要素

アジアは大気汚染(エアロゾル増加)のホットスポット



九州大学 竹村俊彦教授 提供

SPRINTARS

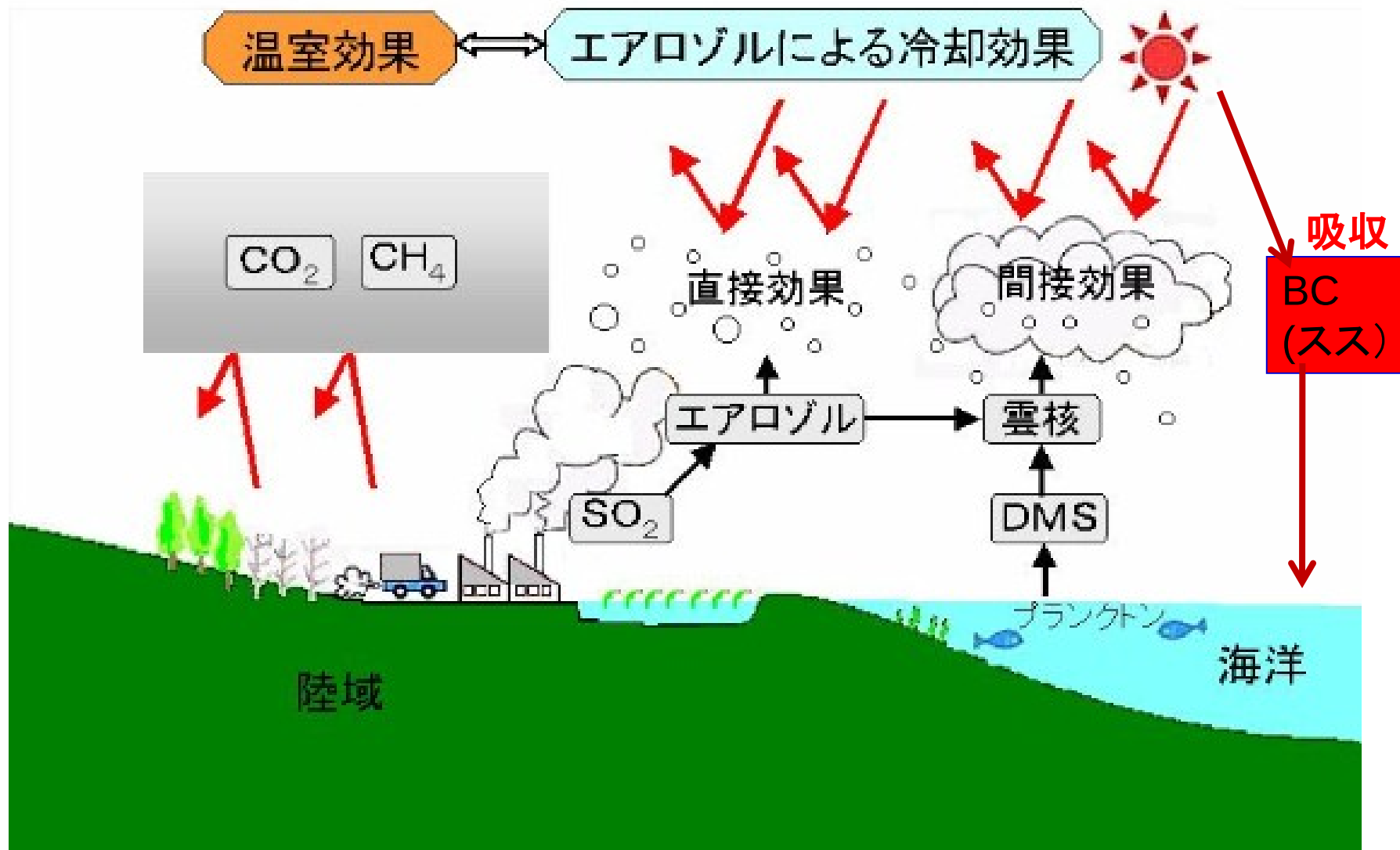


北京の大気汚染



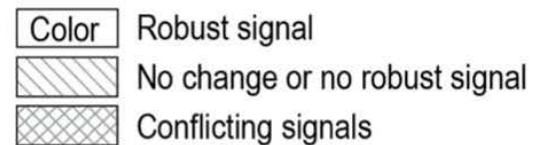
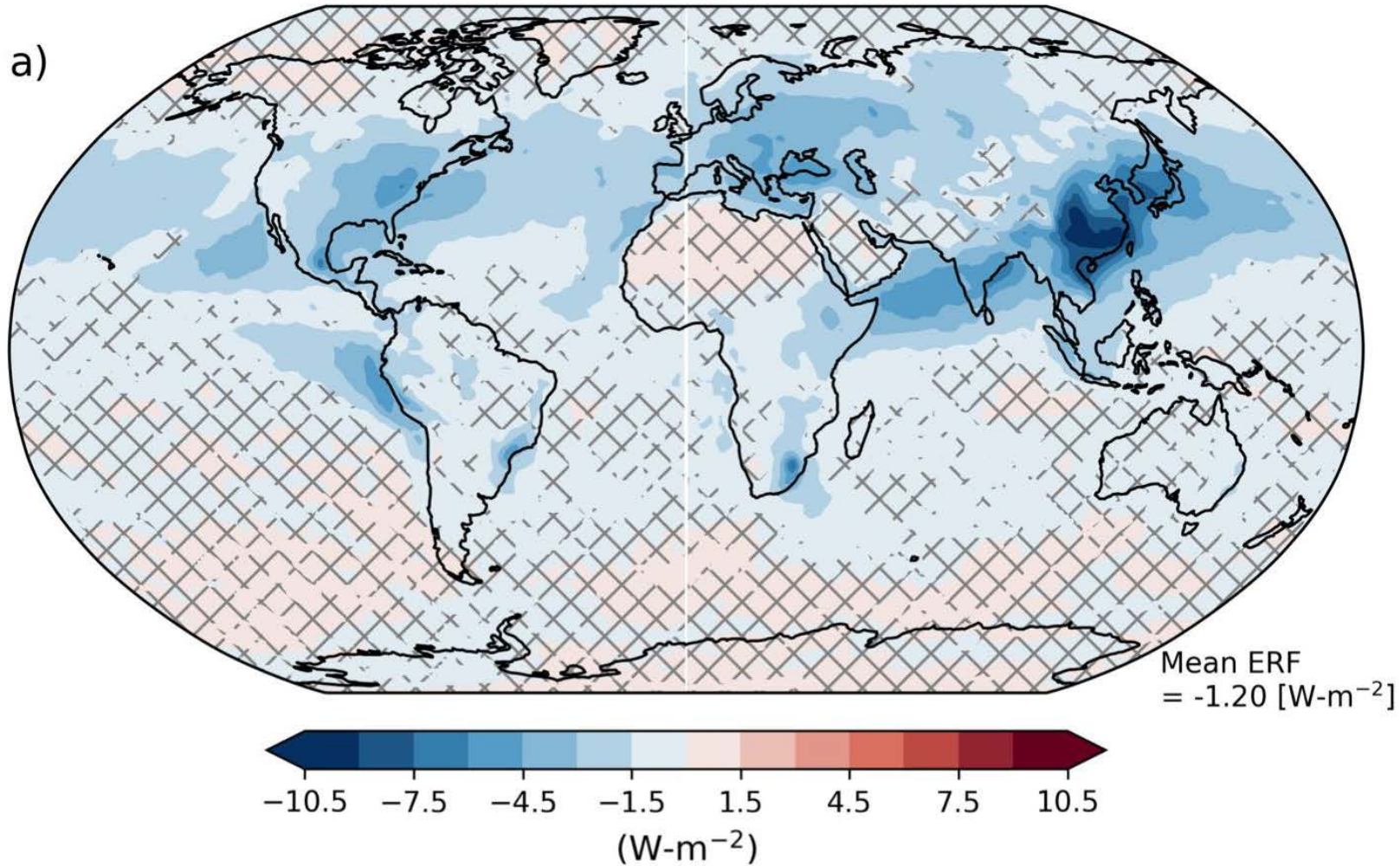
上海の大気汚染

エアロゾル(大気中の微粒子)は、大気汚染による混濁度を増やすだけでなく、雲核となって雲を形成しやすくする



エアロゾルによる冷却(日傘)効果

Net Effective Radiative Forcing
Aerosols



(IPCC, 2021)

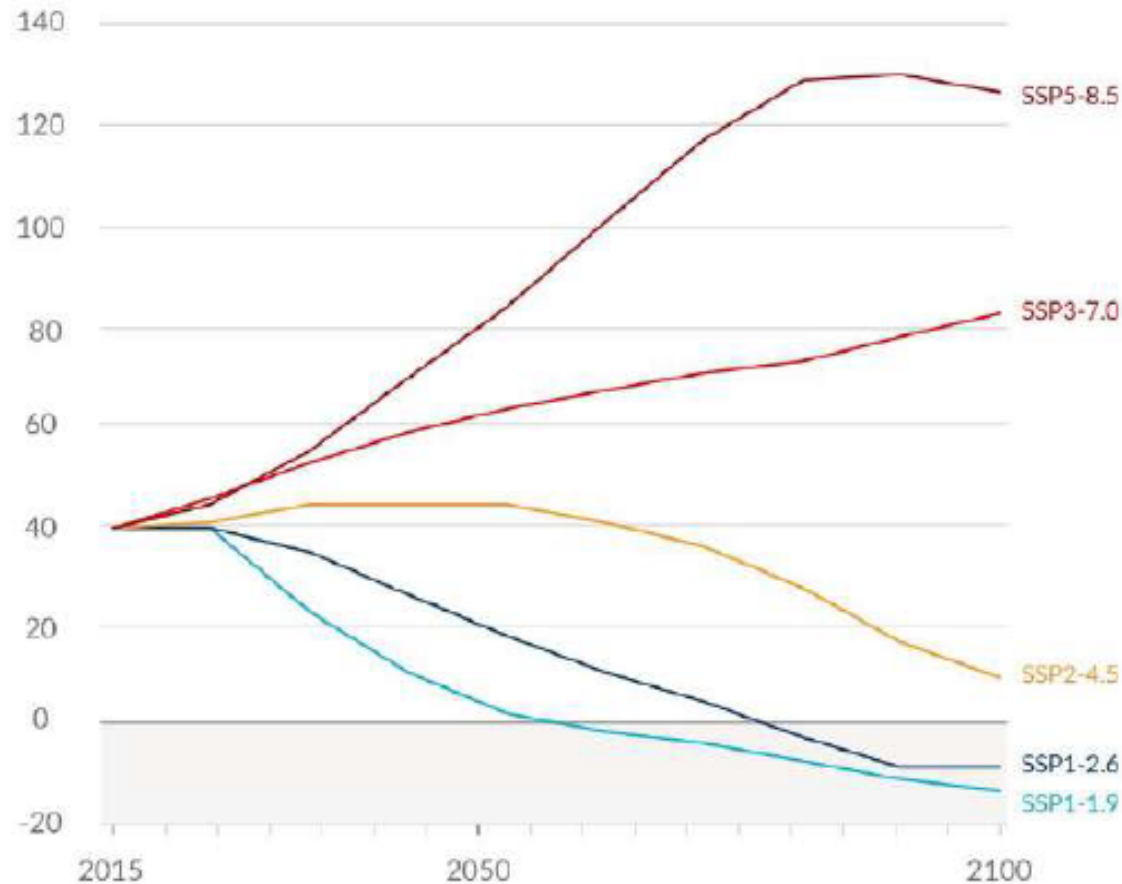
これからの地球気候はどうなるのか？
5つのシナリオにもとづく気候予測の結果

人間活動(温室効果ガス増加+エアロゾル増加)による 5つの気候将来シナリオ

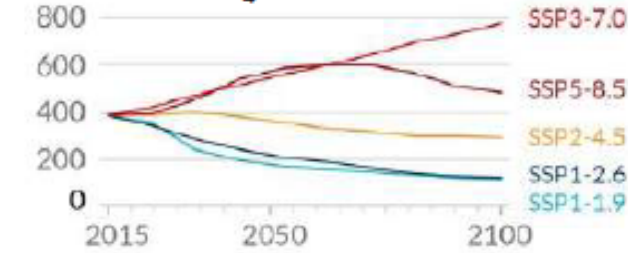
将来の排出は将来の追加的な昇温を引き起こし、合計昇温量は主に過去及び将来の CO_2 排出に依存する

a) 5つの例示的なシナリオにおける CO_2 (左) 及び一部の主要な非 CO_2 駆動要因 (右) の将来の年間排出量

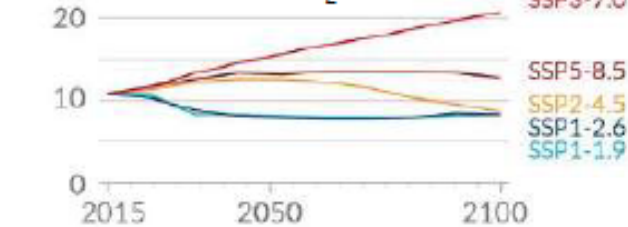
二酸化炭素 ($\text{GtCO}_2/\text{年}$)



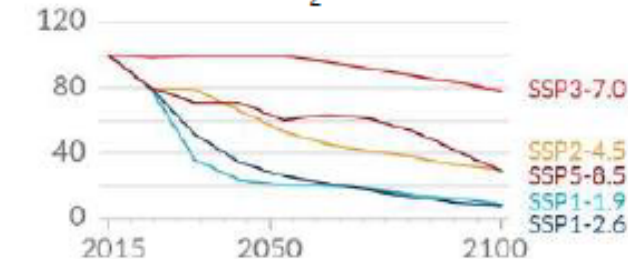
非 CO_2 温室効果ガス
メタン ($\text{MtCH}_4/\text{年}$)



一酸化二窒素 ($\text{MtN}_2\text{O}/\text{年}$)



大気汚染物質かつエアロゾル
二酸化硫黄 ($\text{MtSO}_2/\text{年}$)



(SSP5-8.5)

GHG排出が
非常に多いシナリオ
現状のまま排出が続く

(SSP3-7.0)

GHG 排出が多いシナリオ

(SSP2-4.5)

GHG排出が
中程度のシナリオ

(SSP1-2.6)

GHG排出が少ないシナリオ
2080年頃にゼロ排出となる

(SSP1-1.9)

GHG 排出が
非常に少ないシナリオ
2050年頃にゼロ排出となる

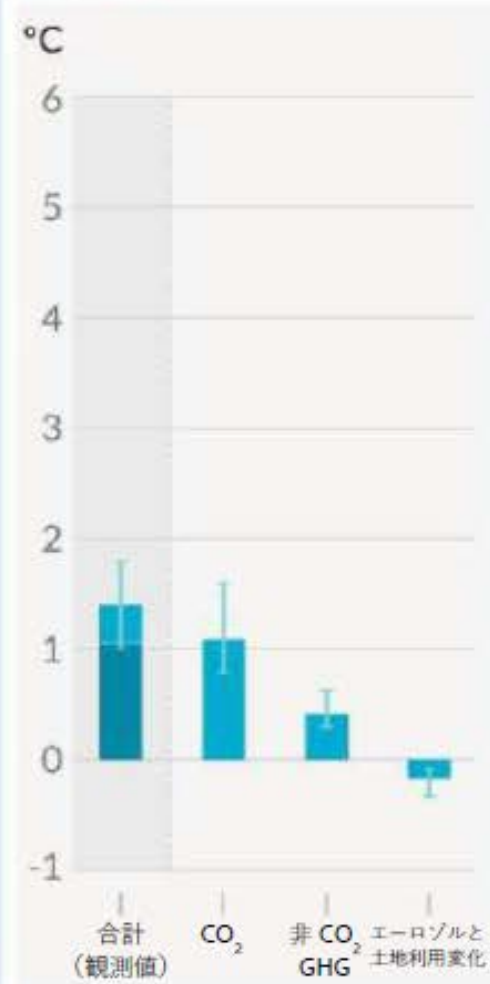
(IPCC,2021)

それぞれのシナリオにおける各温室効果ガス(GHG)とエアロゾルの寄与

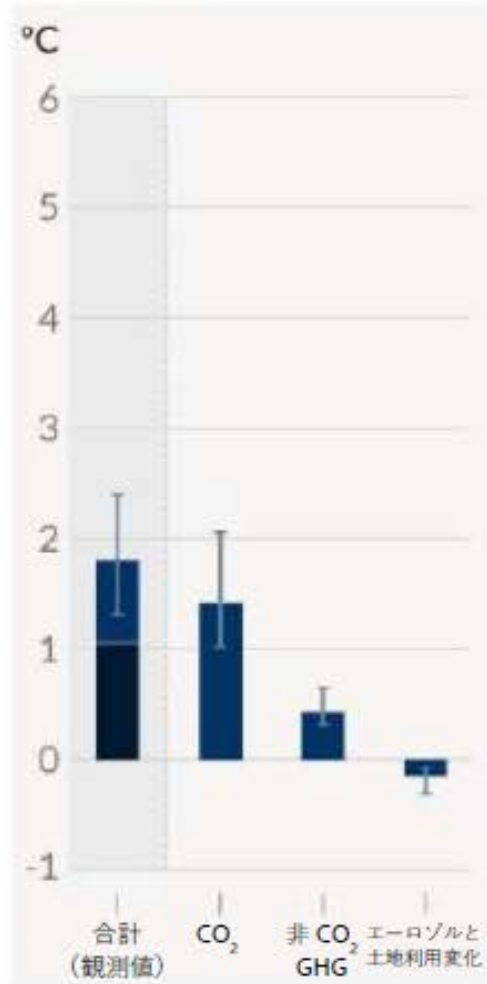
b) 様々な排出による世界平均気温上昇への寄与と CO₂ 排出の支配的な役割

1850～1900 年を基準とした 2081～2100 年の世界平均気温の変化 (°C)

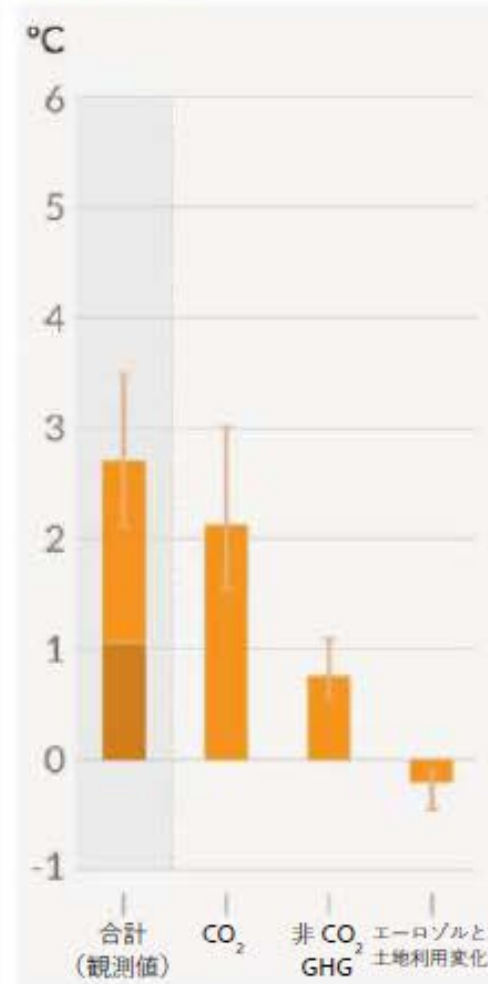
SSP1-1.9



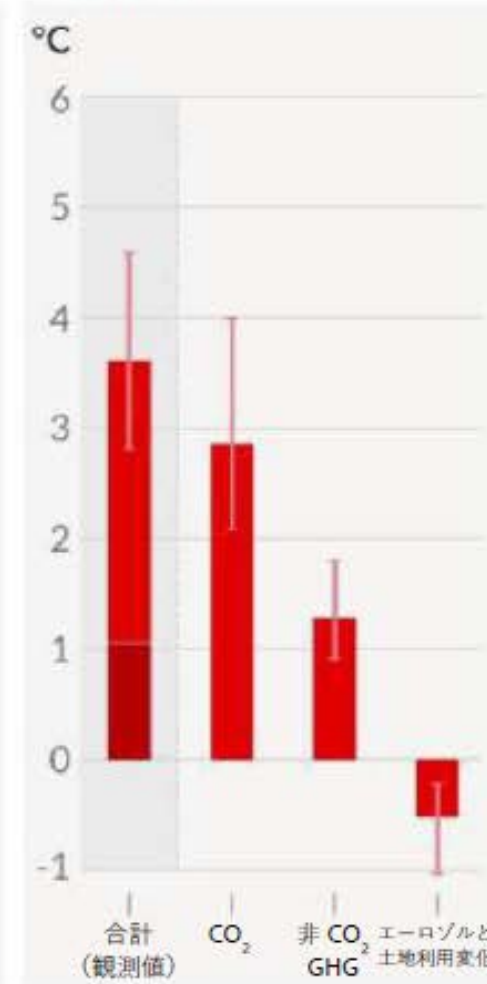
SSP1-2.6



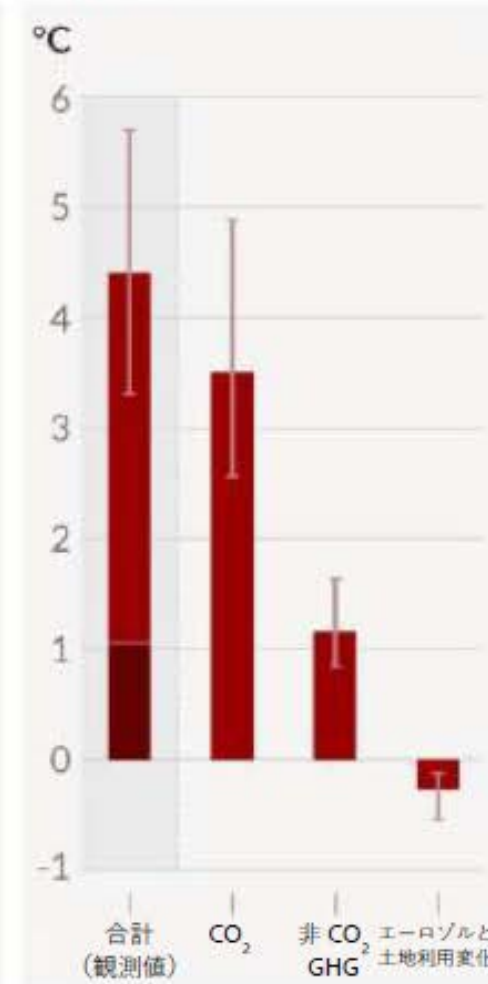
SSP2-4.5



SSP3-7.0



SSP5-8.5



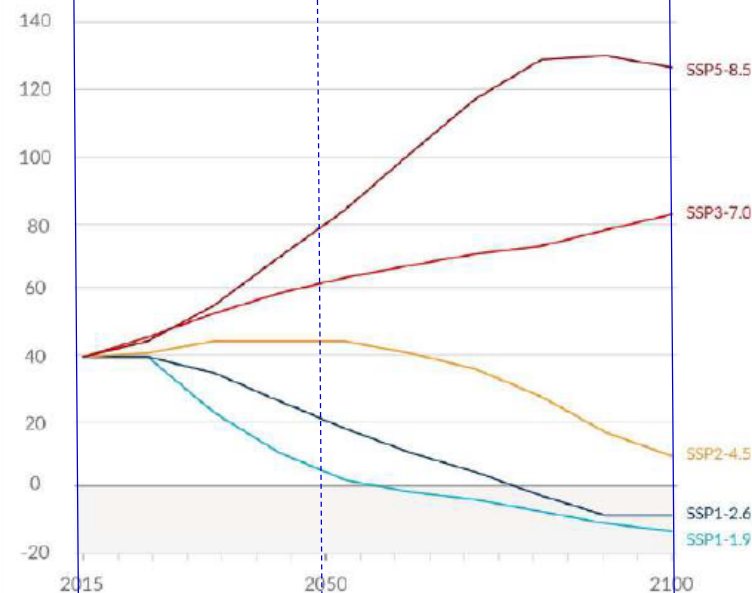
合計昇温量 (暗い色はこれまでに観測された昇温)、CO₂ による昇温、非 CO₂ 温室効果ガス (GHG) による昇温、エアロゾルと土地利用変化による冷却効果

5つの将来シナリオにもとづく地球平均気温の変化予測

将来の排出は将来の追加的な昇温を引き起こし、合計昇温量は主に過去及び将来の CO_2 排出に依存する

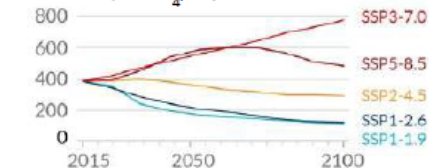
a) 5つの例示的なシナリオにおける CO_2 (左) 及び一部の主要な非 CO_2 駆動要因 (右) の将来の年間排出量

二酸化炭素 ($\text{GtCO}_2/\text{年}$)

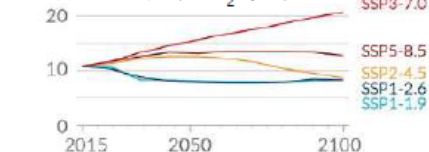


非 CO_2 温室効果ガス

メタン ($\text{MtCH}_4/\text{年}$)

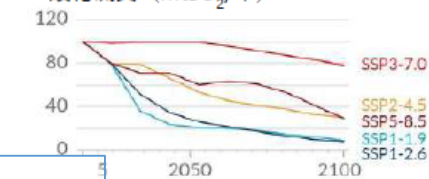


一酸化二窒素 ($\text{MtN}_2\text{O}/\text{年}$)

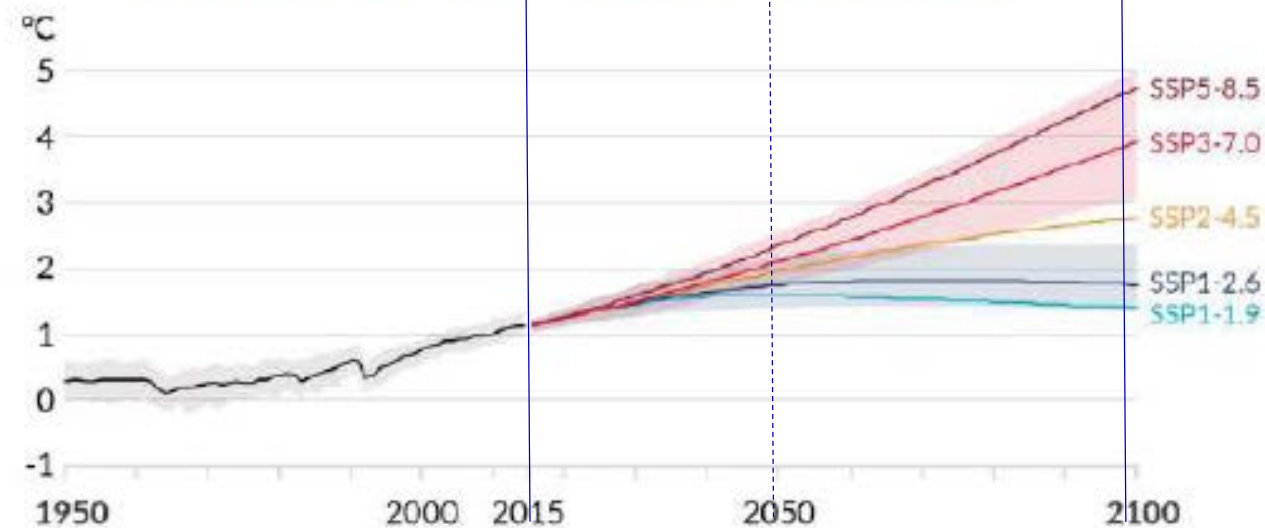


大気汚染物質かつエアロゾル

二酸化硫黄 ($\text{MtSO}_2/\text{年}$)



a) 1850~1900 年を基準とした世界平均気温の変化



シナリオごとの気候上昇の推定値

1.5℃以内に抑えるにはSSP1-1.9, 2℃以内に抑えるには、SSP1-2.6のシナリオしかない

	短期、2021～2040 年		中期、2041～2060 年		長期、2081～2100 年	
シナリオ	最良推定値 (℃)	可能性が非常に 高い範囲 (℃)	最良推定値 (℃)	可能性が非常に 高い範囲 (℃)	最良推定値 (℃)	可能性が非常に 高い範囲 (℃)
SSP1-1.9	1.5	1.2 – 1.7	1.6	1.2 – 2.0	1.4	1.0 – 1.8
SSP1-2.6	1.5	1.2 – 1.8	1.7	1.3 – 2.2	1.8	1.3 – 2.4
SSP2-4.5	1.5	1.2 – 1.8	2.0	1.6 – 2.5	2.7	2.1 – 3.5
SSP3-7.0	1.5	1.2 – 1.8	2.1	1.7 – 2.6	3.6	2.8 – 4.6
SSP5-8.5	1.6	1.3 – 1.9	2.4	1.9 – 3.0	4.4	3.3 – 5.7

表 SPM.1： 複数の証拠に基づく評価による、本報告書で考慮した 5 つの例示的な排出シナリオにおいて選択された 20 年間の世界平均気温の変化。1850～1900 年の世界平均気温に対する変化 (℃) で示す。これは、AR5 の基準期間 1986～2005 年における観測された過去の昇温を改訂した評価を含んでおり、AR6 では AR5 よりも 0.08 [-0.01～0.12] °C 高い (脚注 10 参照)。最近の基準期間 1995～2014 年に対する変化は、本表の値に対して 1850～1900 年から 1995～2014 年の間に観測された昇温の最良推定値である 0.85℃を差し引くことで概算できるかもしれない。

北極海(9月)の海氷面積変化

b) 9月の北極海の海氷面積

10^6 km^2

10

8

6

4

2

0

----- 実質的に氷がない -----

1950

2000

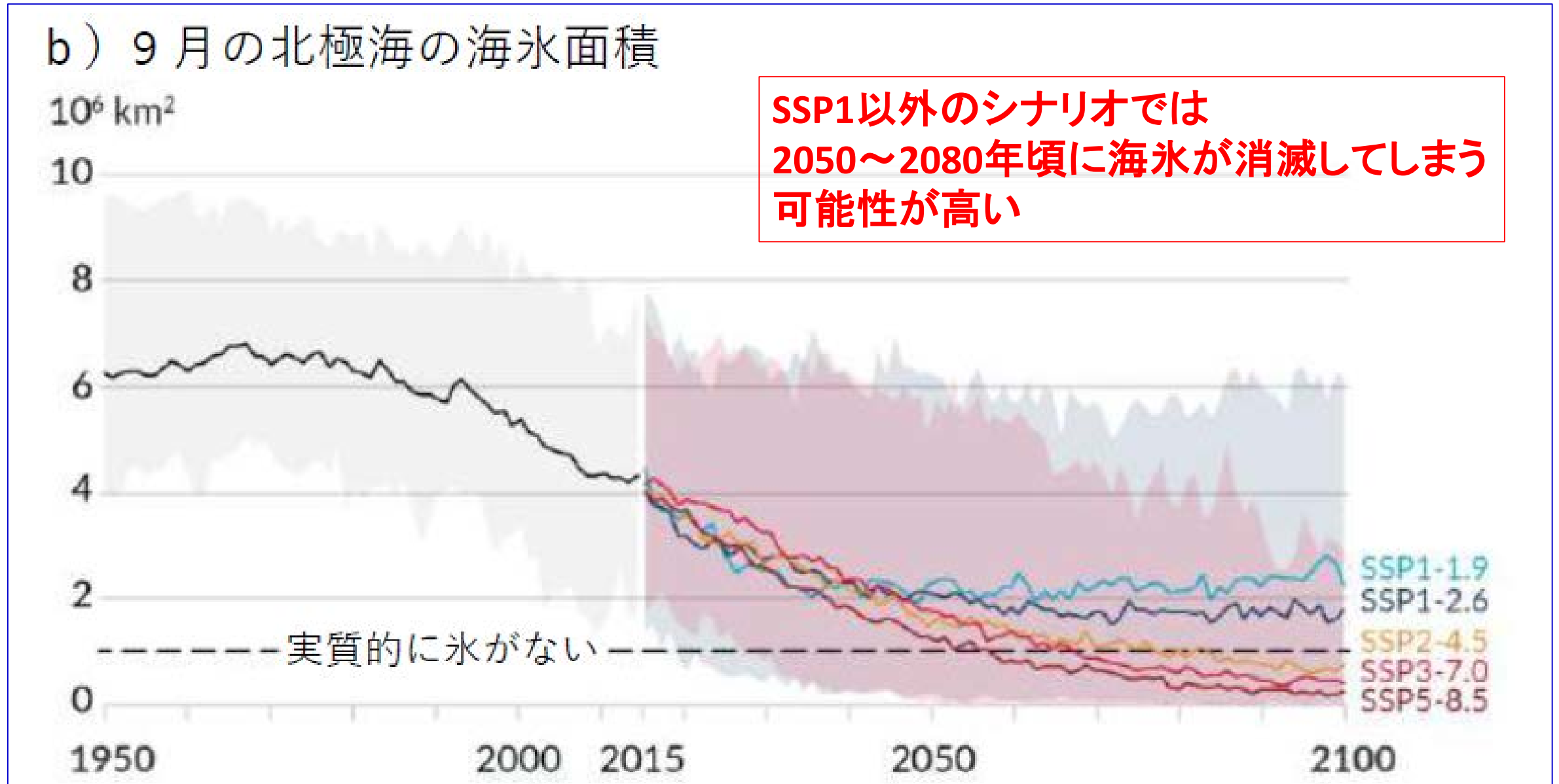
2015

2050

2100

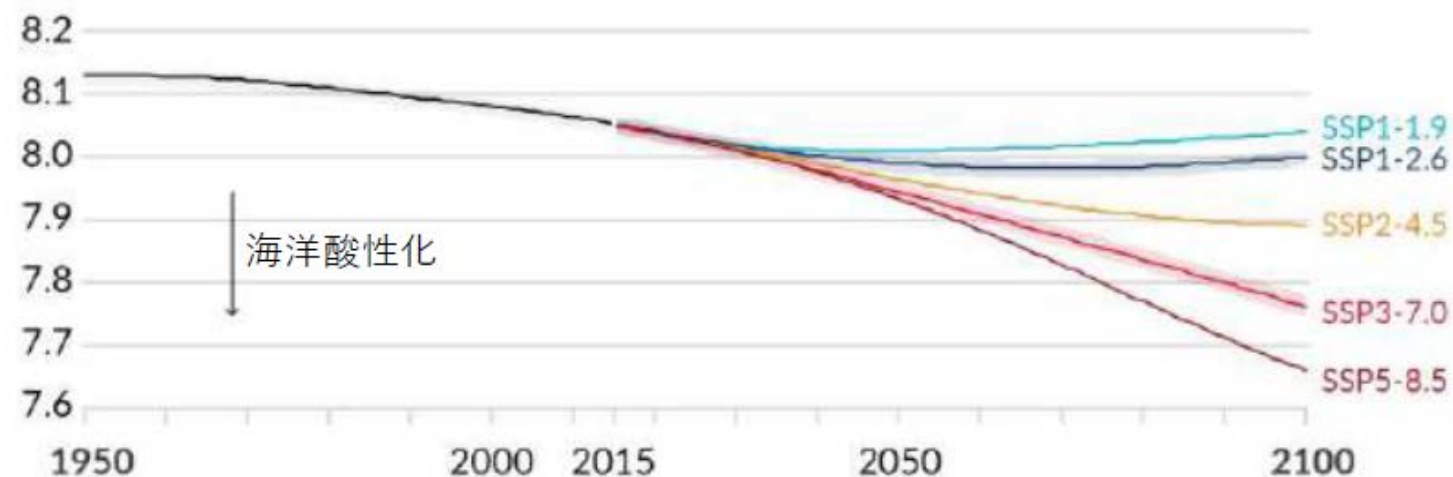
SSP1以外のシナリオでは
2050～2080年頃に海氷が消滅してしまう
可能性が高い

SSP1-1.9
SSP1-2.6
SSP2-4.5
SSP3-7.0
SSP5-8.5

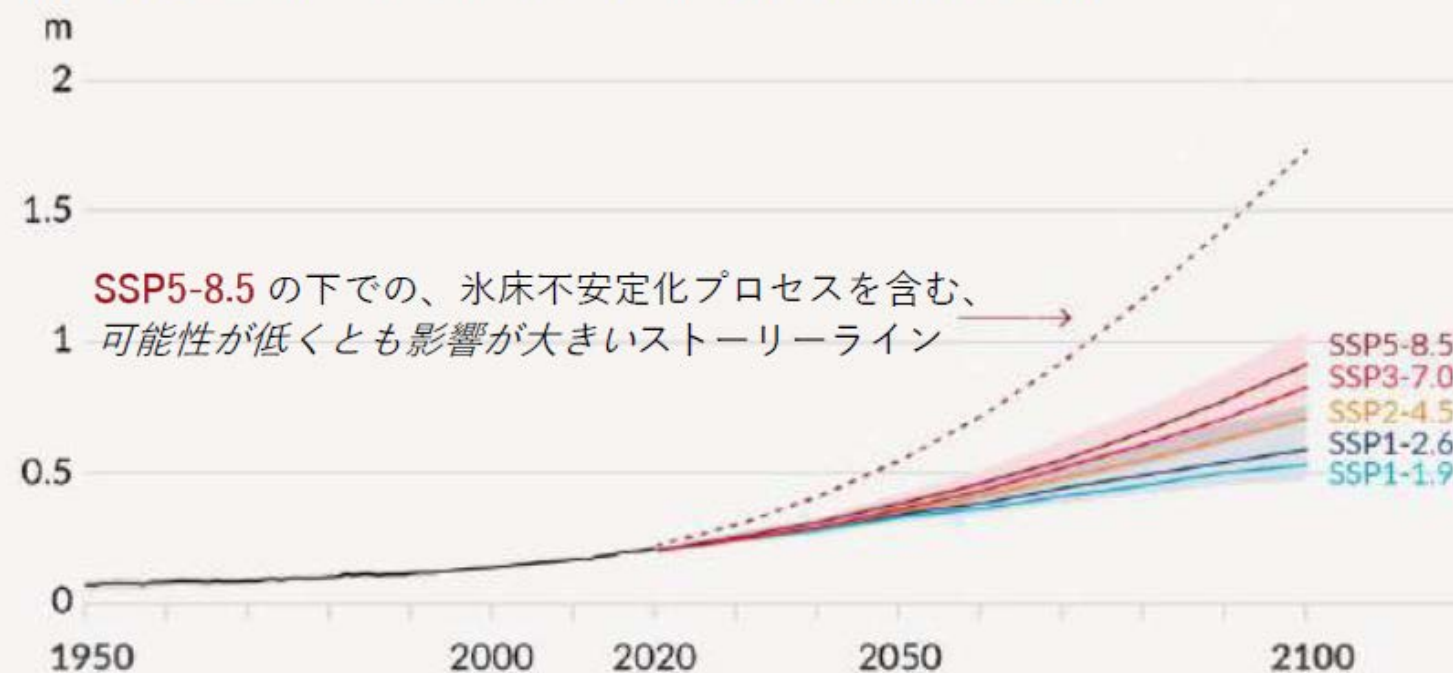


世界平均の海面付近の (上)酸性度(pH)と (下)海面水位の 変化予測

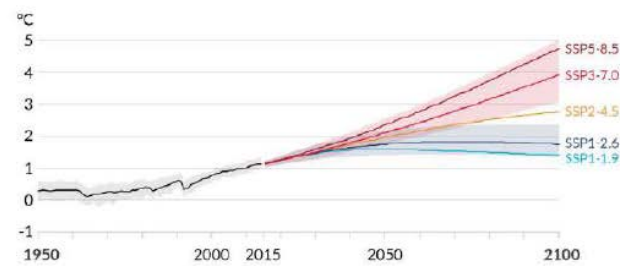
c) 世界全体の海面付近の pH (酸性度の尺度)



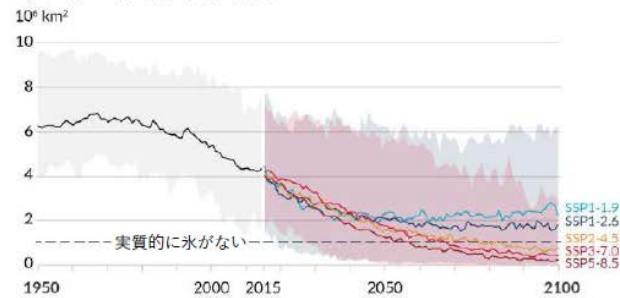
d) 1900 年を基準とした世界平均海面水位の変化



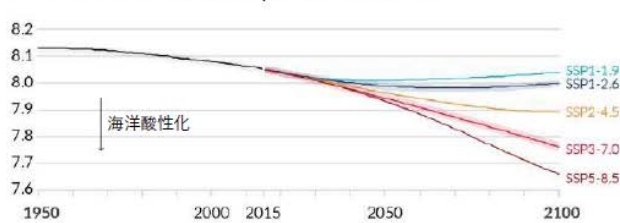
a) 1850～1900 年を基準とした世界平均気温の変化



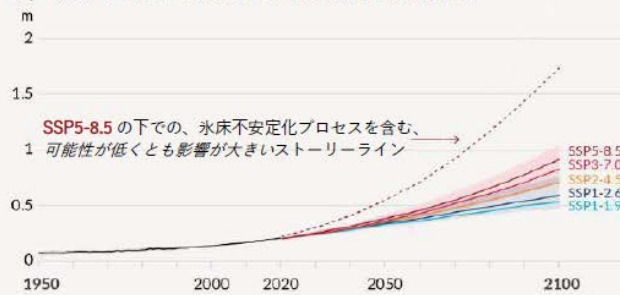
b) 9月の北極海の海水面積



c) 世界全体の海面付近の pH (酸性度の尺度)

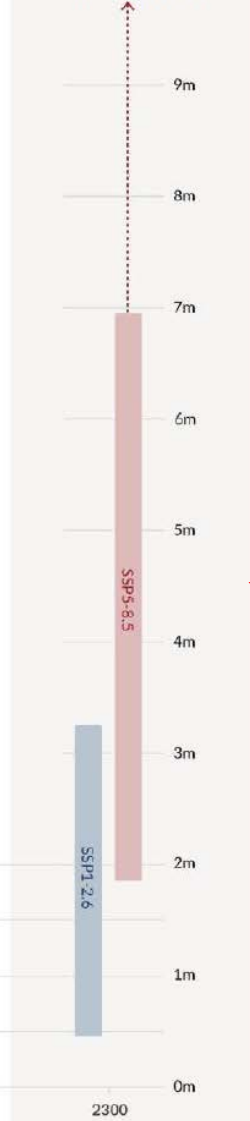


d) 1900 年を基準とした世界平均海面水位の変化

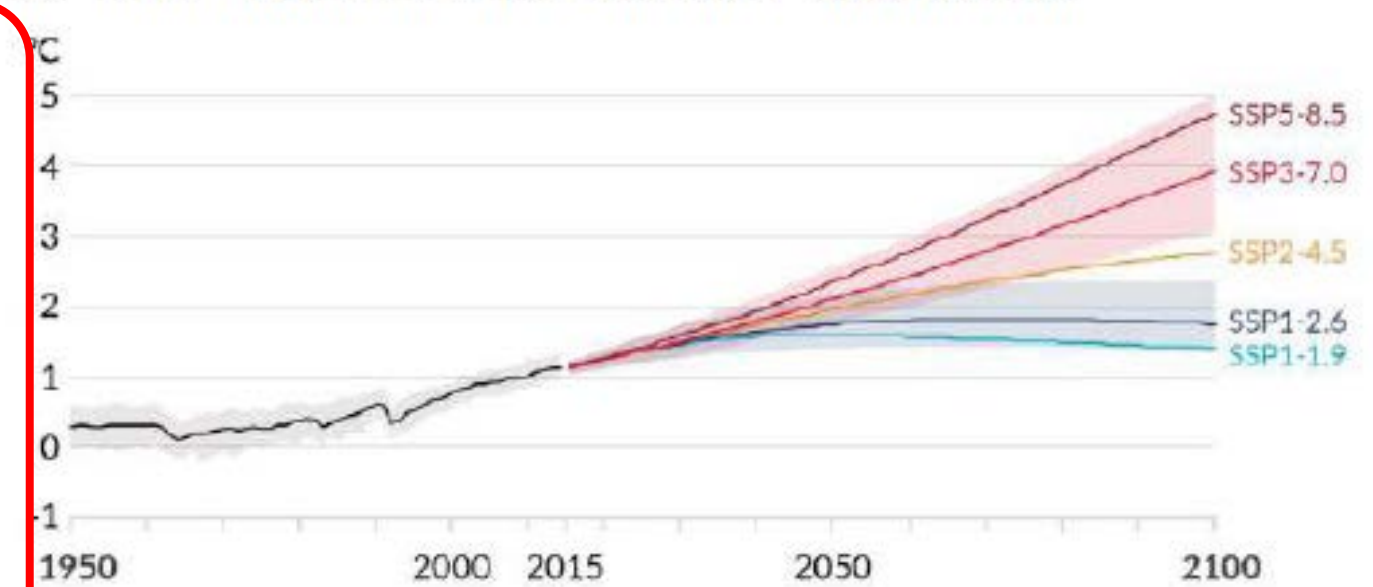


e) 1900 年を基準とした
2300 年の世界平均
海面水位の変化

高排出の場合には
15 m を超える海面水位上昇の
可能性も排除できない



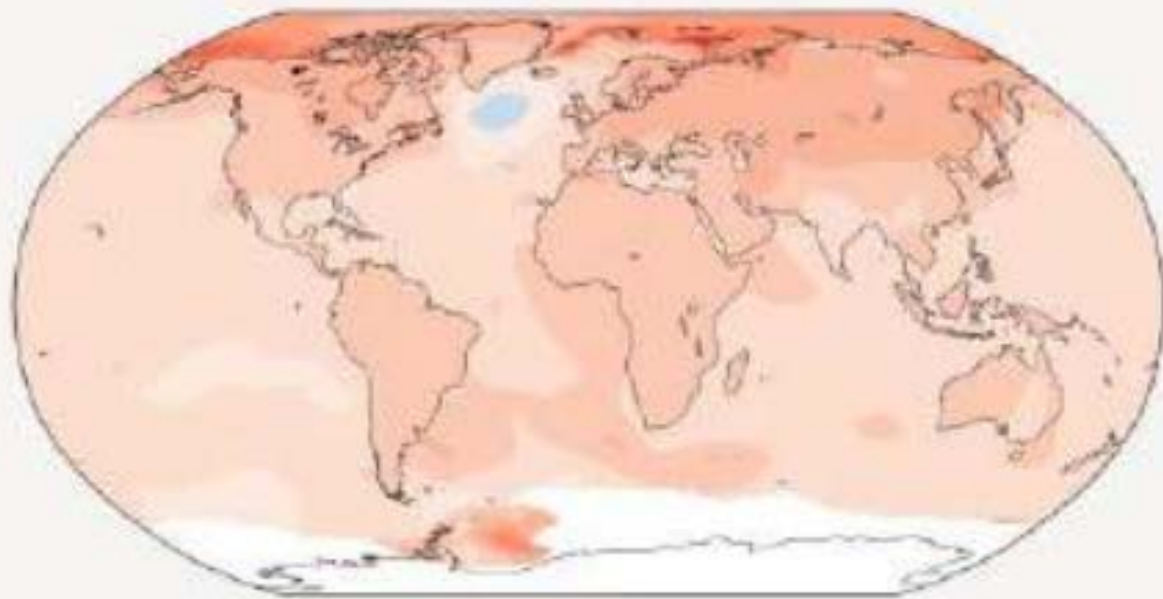
a) 1850～1900 年を基準とした世界平均気温の変化



グリーンランドと南極氷床の大規模な崩壊を伴う過程が入れば、2300年までに海面水位が15m上昇するという予測結果も出ている。

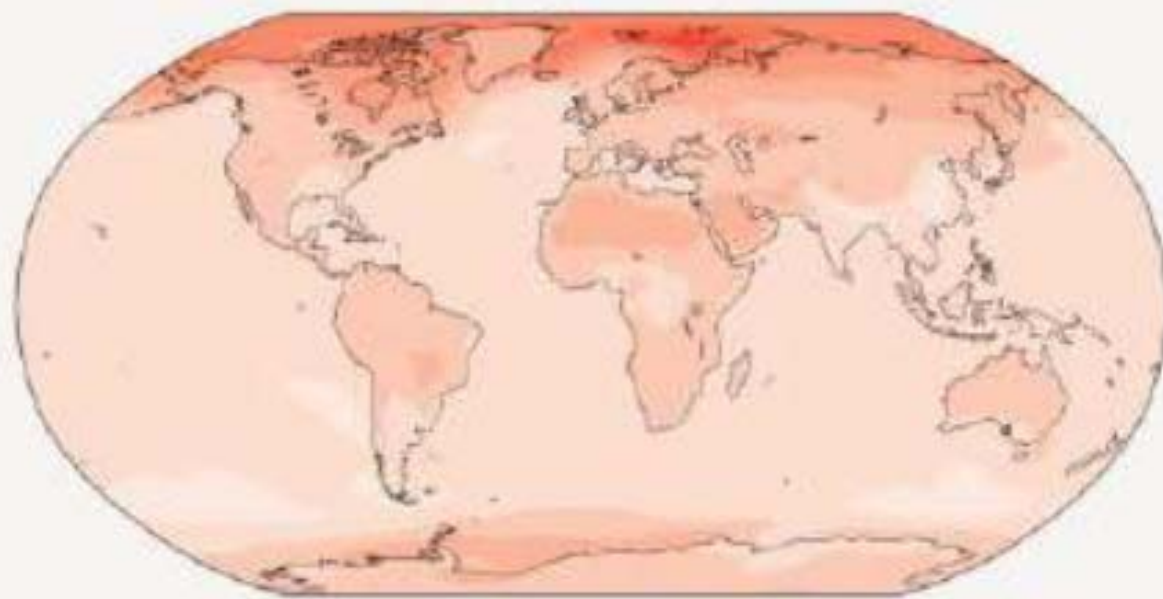
気候モデルの再現性についての検証

地球温暖化が 1°C 進行するごとに観測された変化



観測された気温変化(2010年代)

1°C の地球温暖化において再現された変化



気候モデルで再現された気温変化

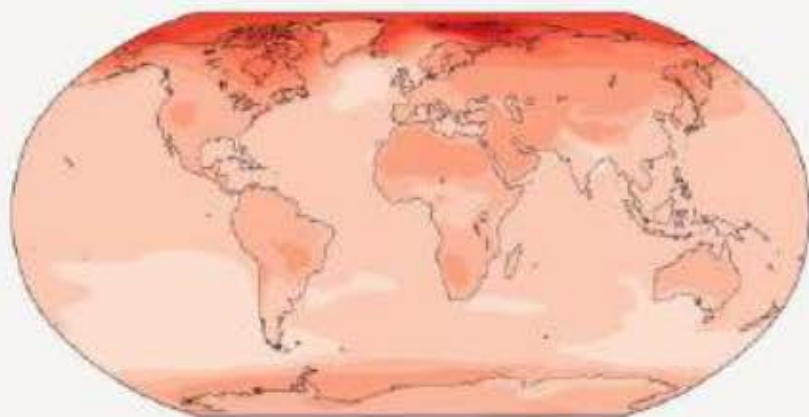
いずれの水準の温暖化でも、陸域は海洋よりも温暖化し、北極及び南極は熱帯よりも温暖化する。

気候モデルにより予測された気温変化

b) 1850～1900 年を基準とする
年平均気温の変化 (°C)

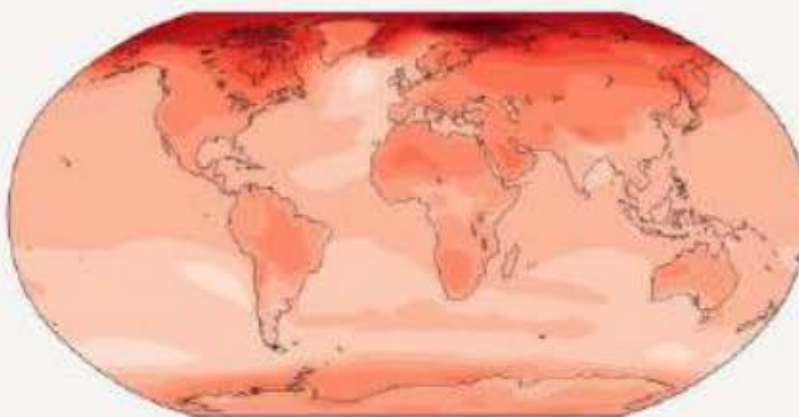
いずれの水準の温暖化でも、陸域は海洋よりも温暖化し、北極及び南極は熱帯よりも温暖化する。

1.5°Cの地球温暖化において再現された変化



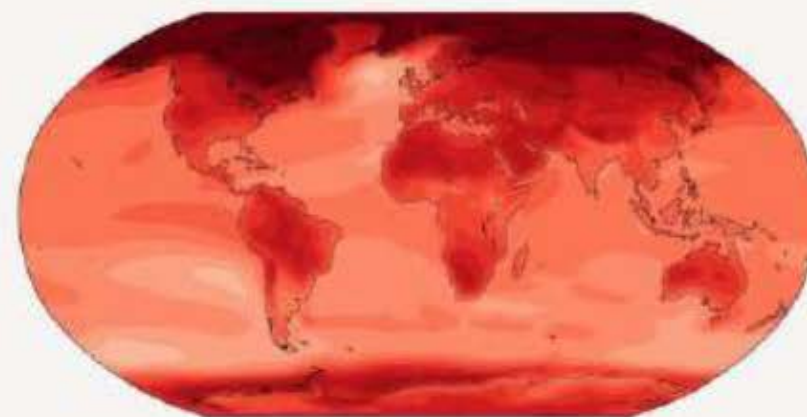
全球平均 1.5°C増加

2°Cの地球温暖化において再現された変化

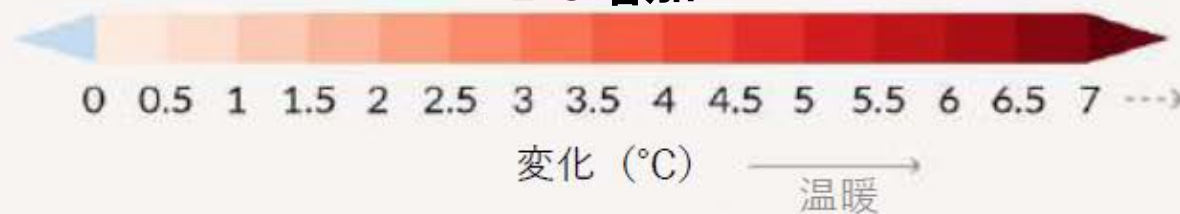


2°C増加

4°Cの地球温暖化において再現された変化



4°C増加



(IPCC,2021)

CO2排出量が多いほど、陸と海で吸収されるCO2の割合は小さくなる

5つの例示的なシナリオにおいて、1850～2100年に陸域と海洋が吸収（着色）及び大気中に残留（灰色）した累積CO₂排出量の総量

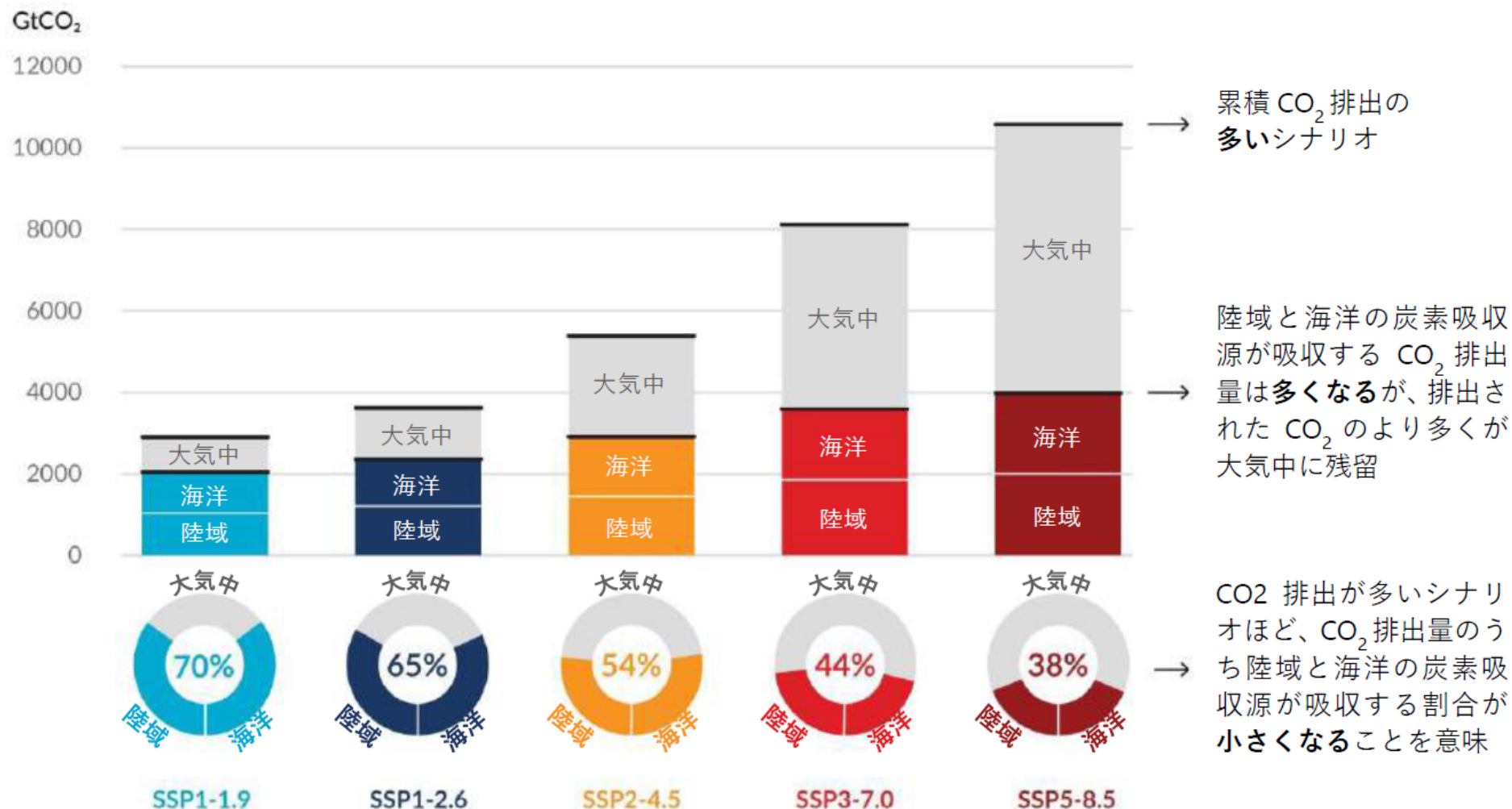


図 SPM.7：5つの例示的なシナリオにおける、2100年までに陸域と海洋に吸収される累積人為起源CO₂排出量

1850年以後の累積での
CO₂排出量増加と、
世界平均気温の上昇は
非常に良い比例関係に
あることがすることが
明らかになった

(IPCC,2021)

CO₂ 排出が増えるたびに地球温暖化が進行

累積 CO₂ 排出量 (GtCO₂) の関数としての 1850～1900 年以降の世界平均気温の上昇 (°C)

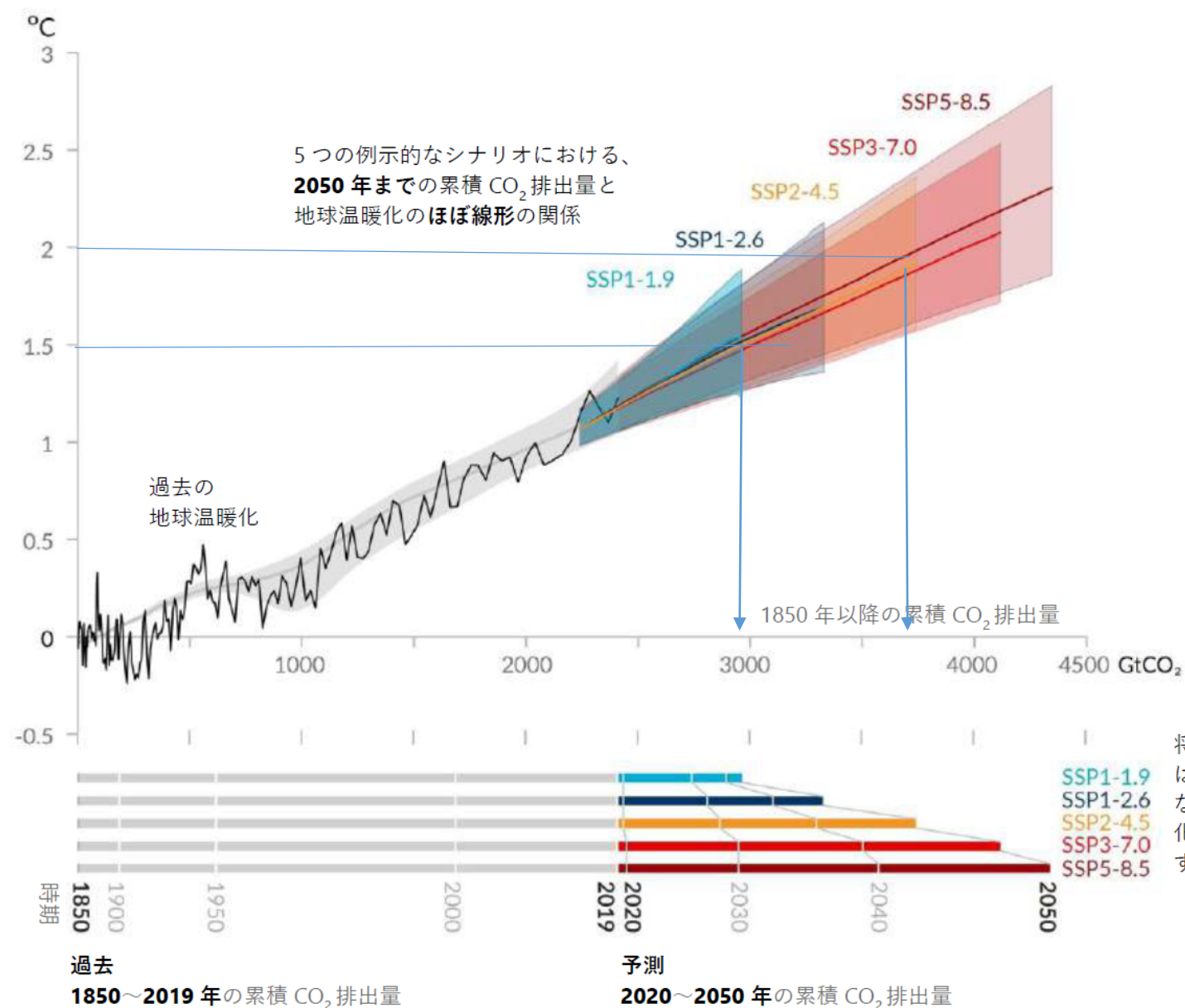


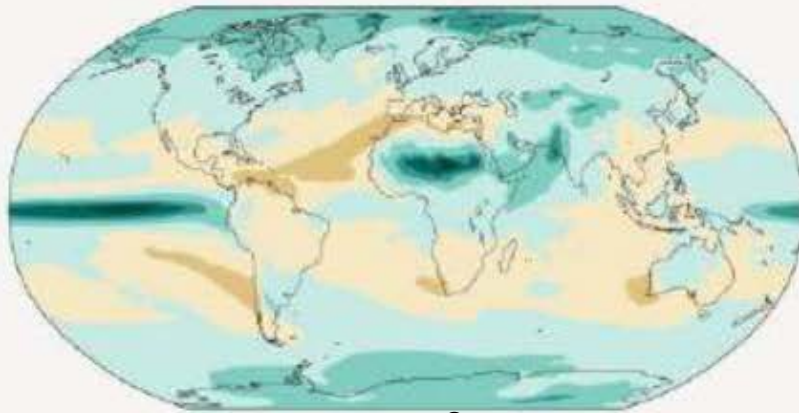
図 SPM.10： 累積 CO₂ 排出量と世界平均気温上昇との間の、ほぼ線形の関係。

温暖化に伴って降水量はどう変化するか

c) 1850～1900 年を基準とする
年平均降水量の変化 (%)

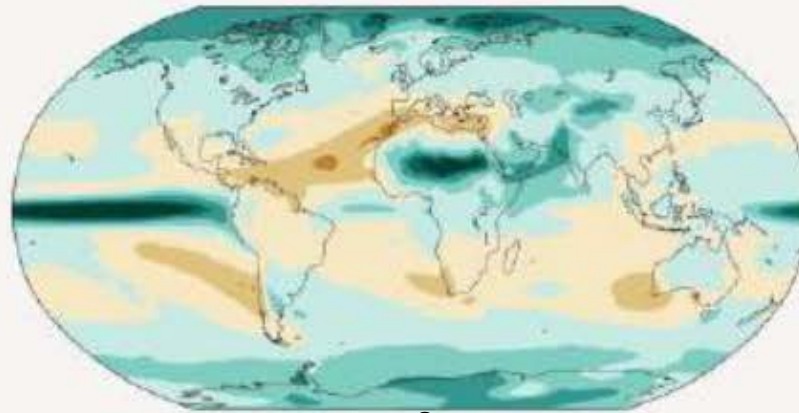
降水量は、高緯度帯、赤道太平洋及び一部モンスーン地域で増加するが、
亜熱帯の一部及び熱帯の限られた地域で減少すると予測される。

1.5°Cの地球温暖化において再現された変化



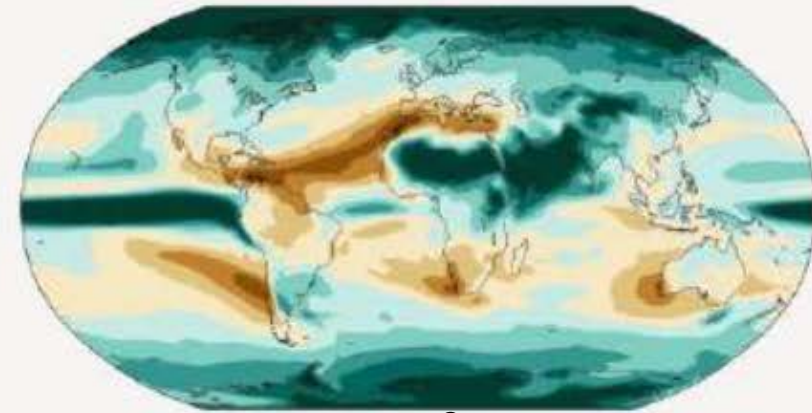
1.5 °C

2°Cの地球温暖化において再現された変化



2°C

4°Cの地球温暖化において再現された変化



4°C

基準となる状況で乾燥している地域では、比較的小さな絶対値の変化でも、割合として見れば大きな変化として表れるかもしれない。



陸域における極端な高温が出現する頻度の変化

陸域における高温に関する極端現象

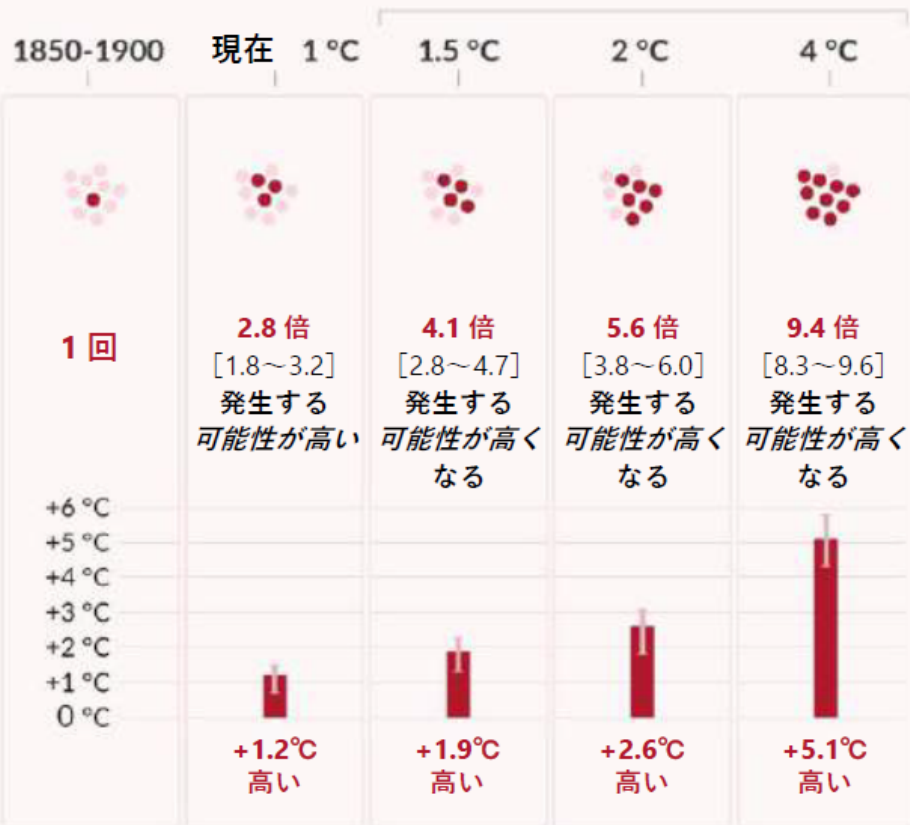
10年に1回の現象

人間の影響がない気候で
平均して10年に1回発生するような
極端な気温の頻度と強度の増加

将来の地球温暖化の水準

10年あたりの頻度

強度の増加



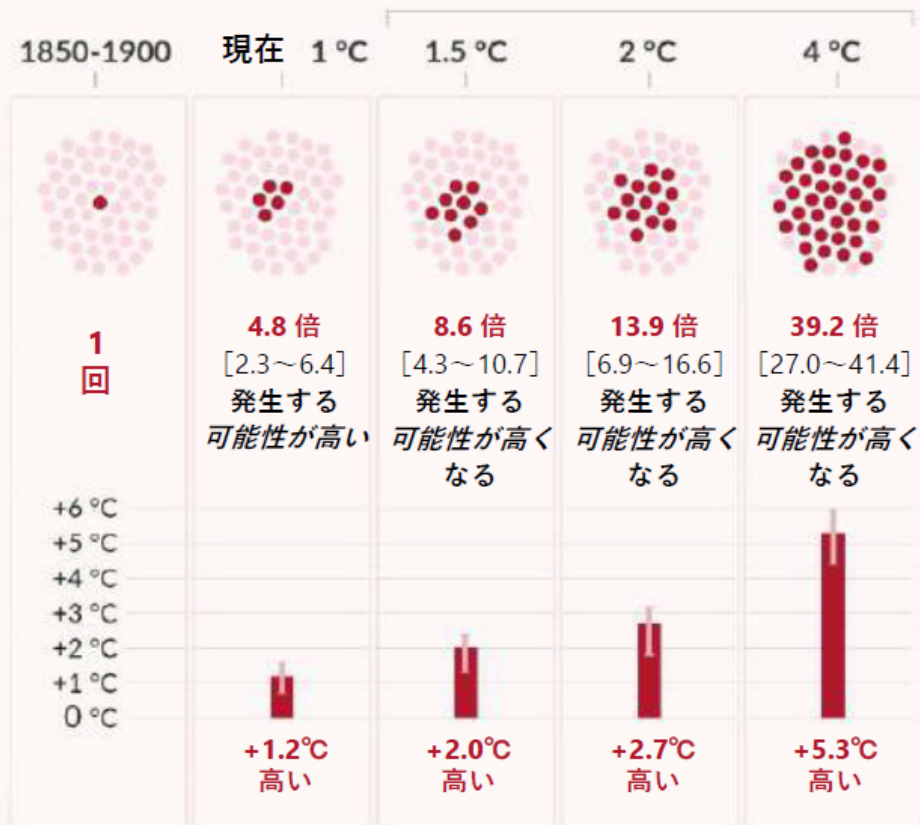
50年に1回の現象

人間の影響がない気候で
平均して50年に1回発生するような
極端な気温の頻度と強度の増加

将来の地球温暖化の水準

50年あたりの頻度

強度の増加



陸域における大雨および干ばつの出現頻度

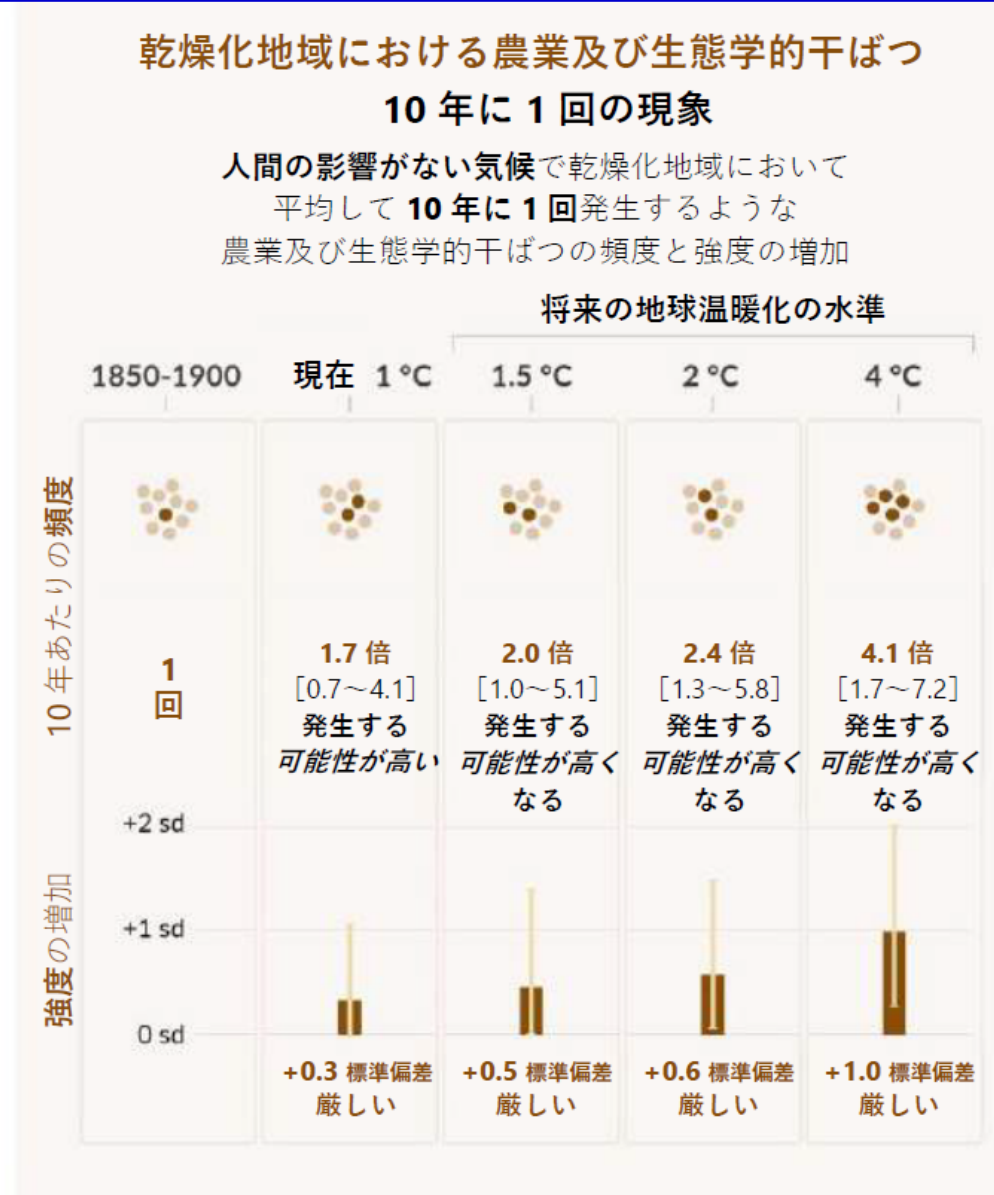
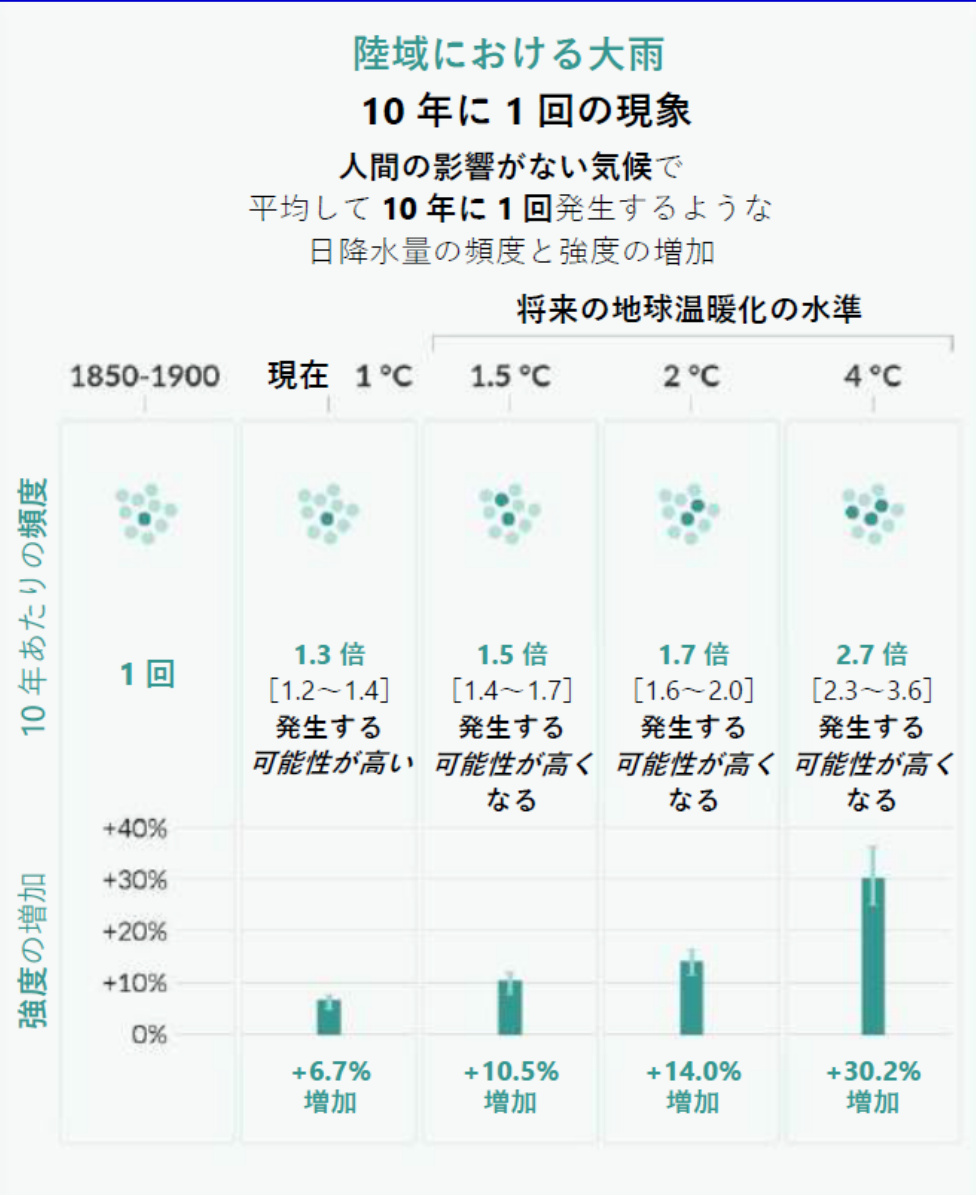


図 SPM.6： 陸域における極端な高温、陸域における極端な降水及び乾燥化地域における農業及び生態学的干ばつの予測される変化

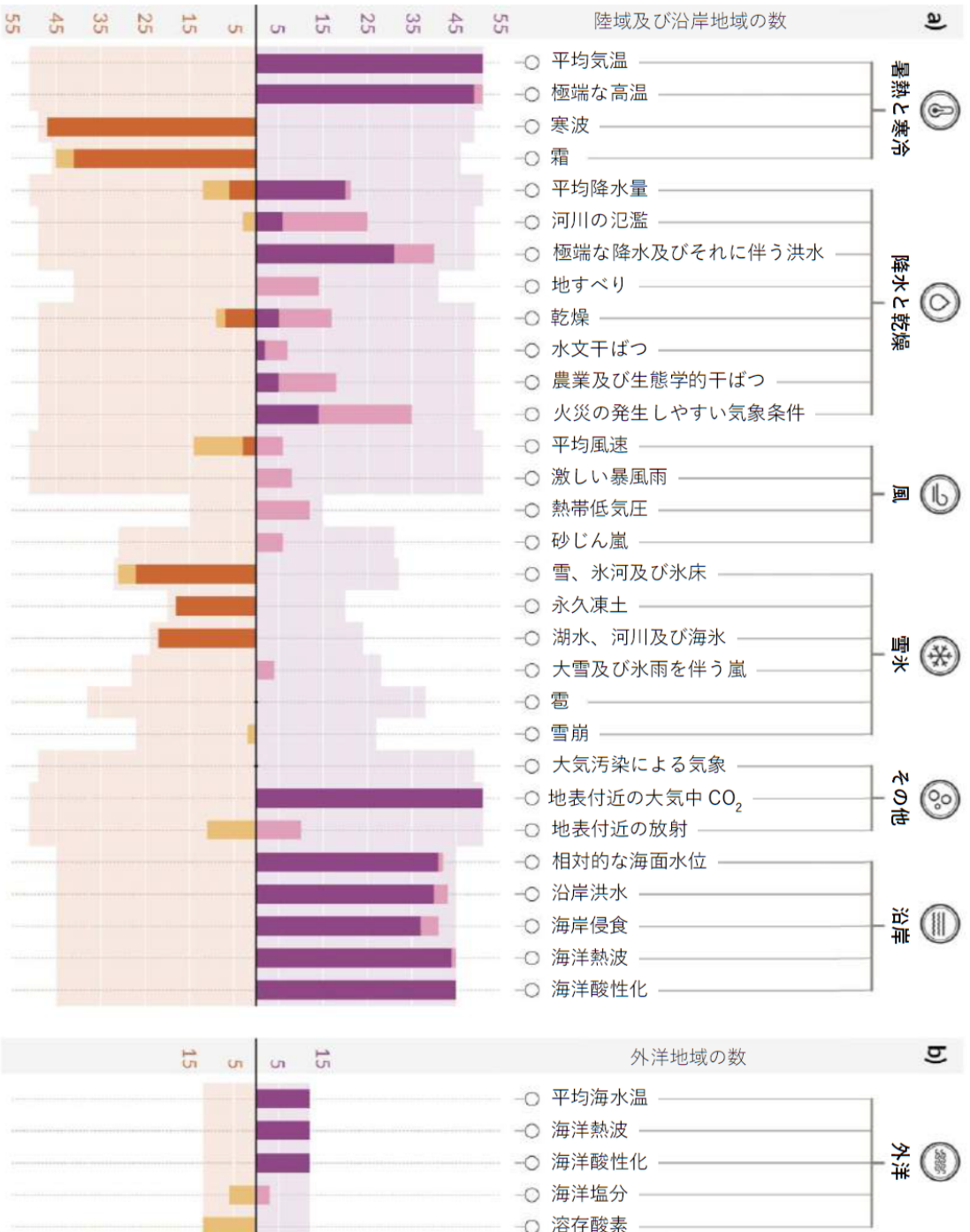
複数の気候的な影響駆動要因が、世界中の全ての地域で変化すると予測される



interactive-atlas.ipcc.ch

気候的な影響駆動要因 (CIDs) は、社会や生態系の要素に影響する物理学的な気候システムの状態 (例えば平均、現象、極端現象) である。CIDs とその変化は、システムの許容範囲に応じて有害にも有益にも中立にも、また相互に作用するシステムの構成要素と地域においてそれらが混合した状態にもなりうる。CIDs は 7 種類に分類され、図中のアイコンの下にまとめられている。全ての地域で少なくとも 5 個、ほぼ全て (96%) の地域で少なくとも 10 個、半数の地域で少なくとも 15 個の CIDs の変化を経験すると予測される。多くの CIDs では、変化する場所に地理的なばらつきが大きい。そのため、各地域で特有の CID 変化の組み合わせを経験すると予測される。図中の各棒グラフは、WG1 のインタラクティブ・アトラスで検証している地域ごとの特定の变化をまとめて示す。

気候的な影響駆動要因 (CID) が**増加**又は**減少**すると**確信度が高く**(暗い色) 又は**確信度が中程度**(明るい色) で予測される陸域及び沿岸地域 (a) 及び外洋地域 (b) の数



棒グラフの凡例

- 増加で確信度が高い地域
- 増加で確信度が中程度の地域
- 減少で確信度が高い地域
- 減少で確信度が中程度の地域

背後の薄い色について

グラフの棒の背後の薄い色は、各 CID が関連する地域の最大数を表す。これは横軸について対称であり、CID の増加 (上方) 又は減少 (下方) に関連している領域の最大数を示す。

将来変化の評価について

変化は、2050 年頃を中心とする 20~30 年間や 2°C の地球温暖化と一致する期間を、1960~2014 年又は 1850~1900 年の同程度の期間と比較したものである。

温暖化でどのような気候影響駆動要因*が増加(減少)するか？

* Climate Impact Driver (CID)



interactive-atlas.ipcc.ch

日本(および京都)の気候はどう変動しているか？
将来、どう変化するか？

文部科学省・気象庁編
「日本の気候変動2020」報告書より

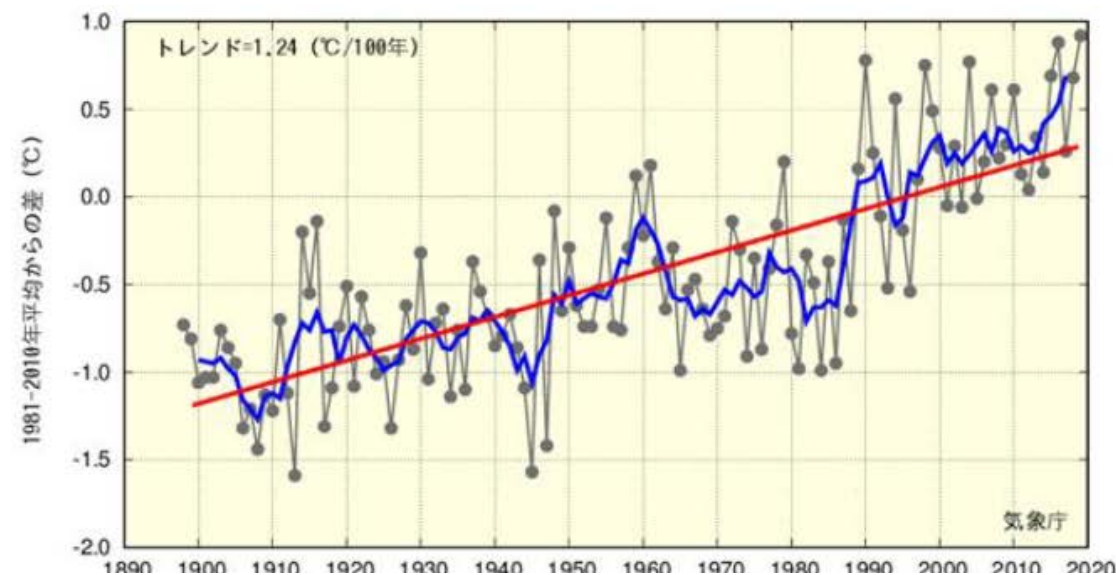


図 2.1 日本の年平均気温偏差の
経年変化 (1898～2019 年)

細線 (黒) : 各年の平均気温の基準
値からの偏差、太線 (青) : 偏差の
5 年移動平均値、直線 (赤) : 長期変
化傾向。基準値は 1981～2010 年の
30 年平均値。

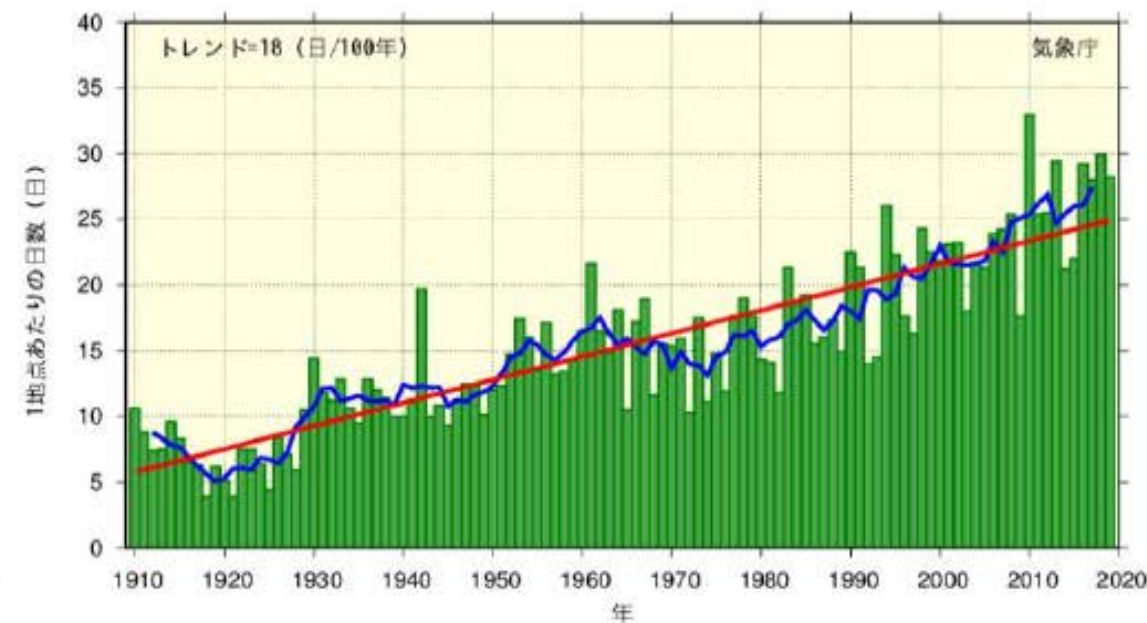
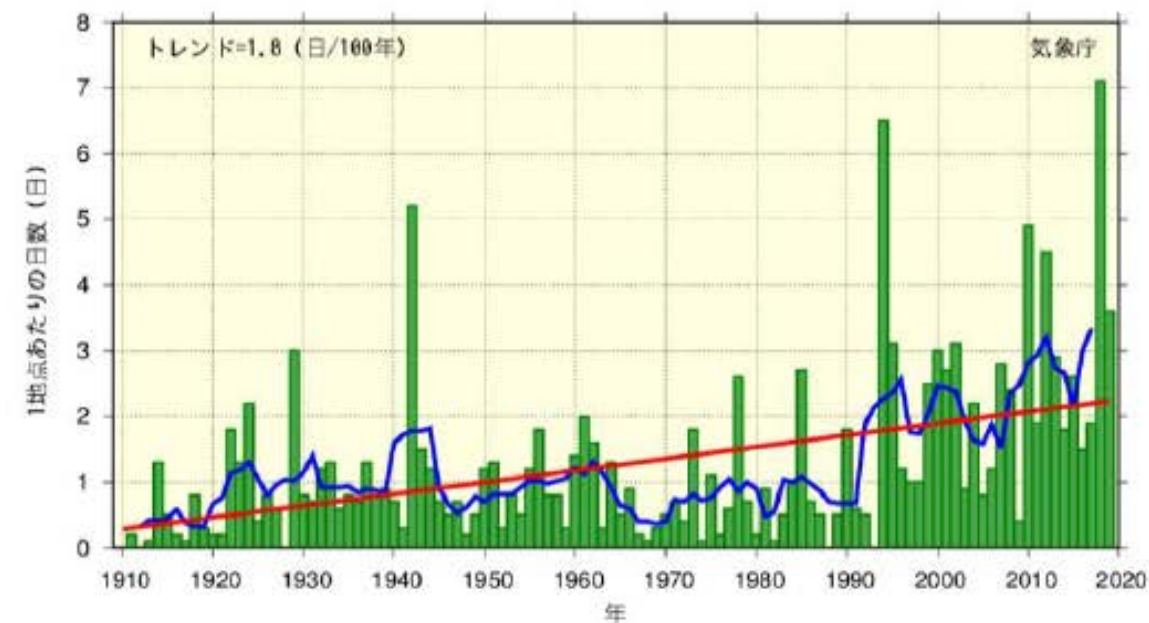


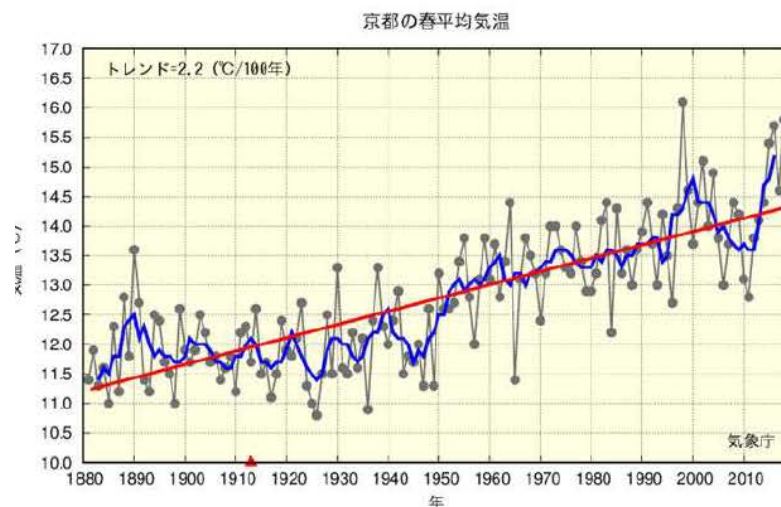
図 2.2 日本の日最高気温 35°C以上 (猛暑日) と日最低気温 25°C以上 (熱帯夜) の
年間日数の経年変化 (1910～2019 年)

京都(京都地方気象台)における気温の経年変化(1881~2018年)

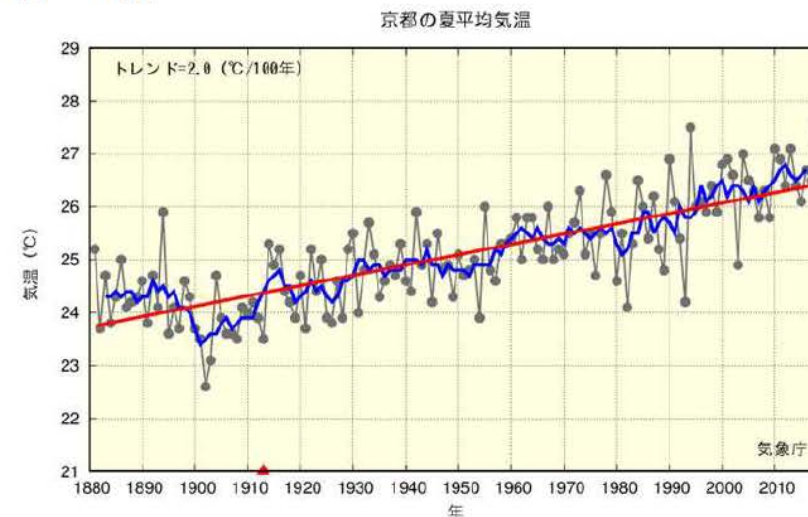
細い折れ線(黒)は各年の値、太い折れ線(黒)は5年移動平均、直線(赤・緑・青)は長期変化傾向。

横軸上の▲は、観測所の移転を示します。移転に伴い移転前の観測値は補正して統計値としていますので、実際の観測値とは値が異なります。

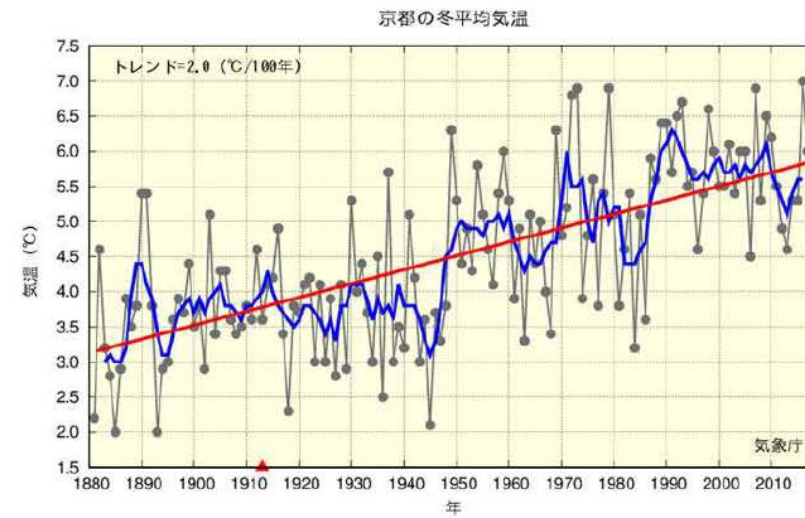
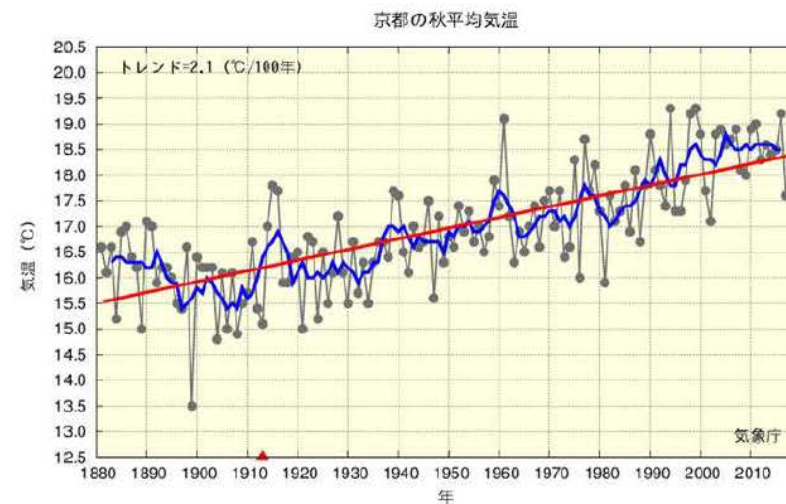
* 春(3月~5月)、夏(6月~8月)、秋(9月~11月)、冬(12月~2月)



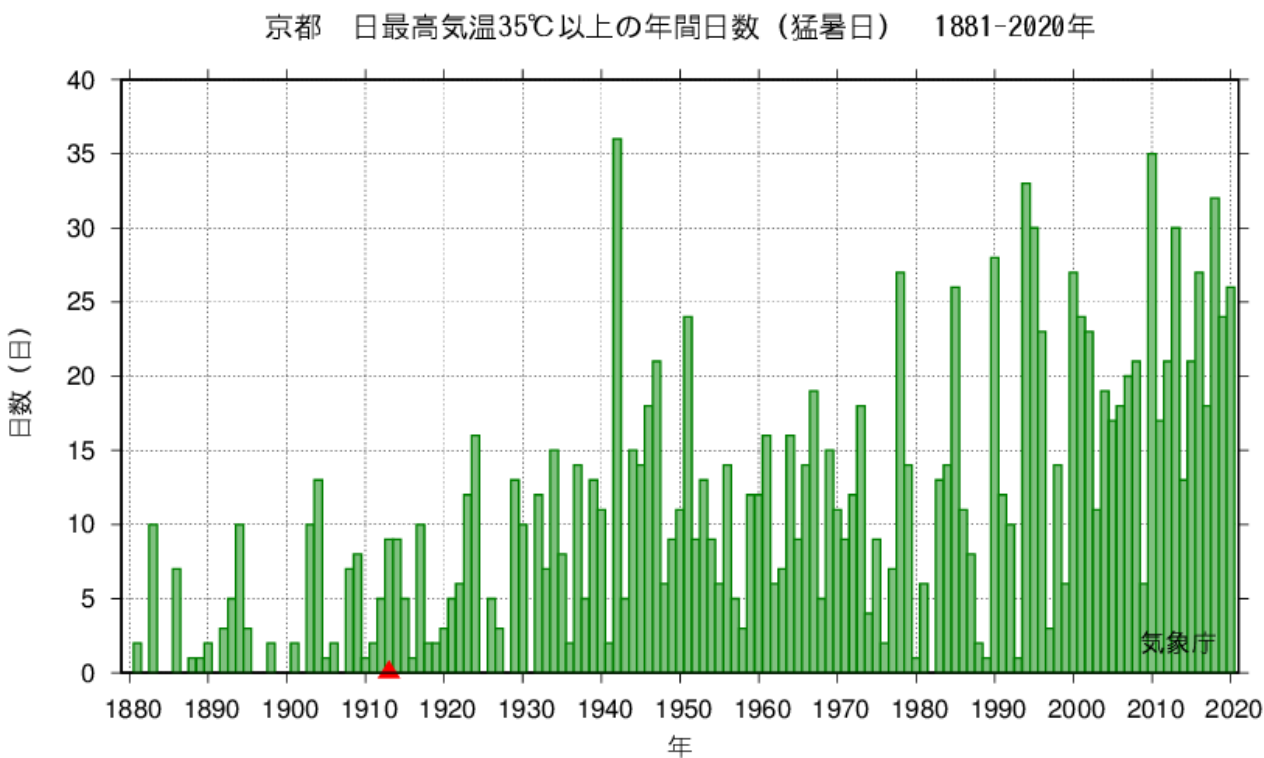
青い折れ線は、偏差の5年移動平均を示す。
赤い直線は、長期的な変化傾向を示す。



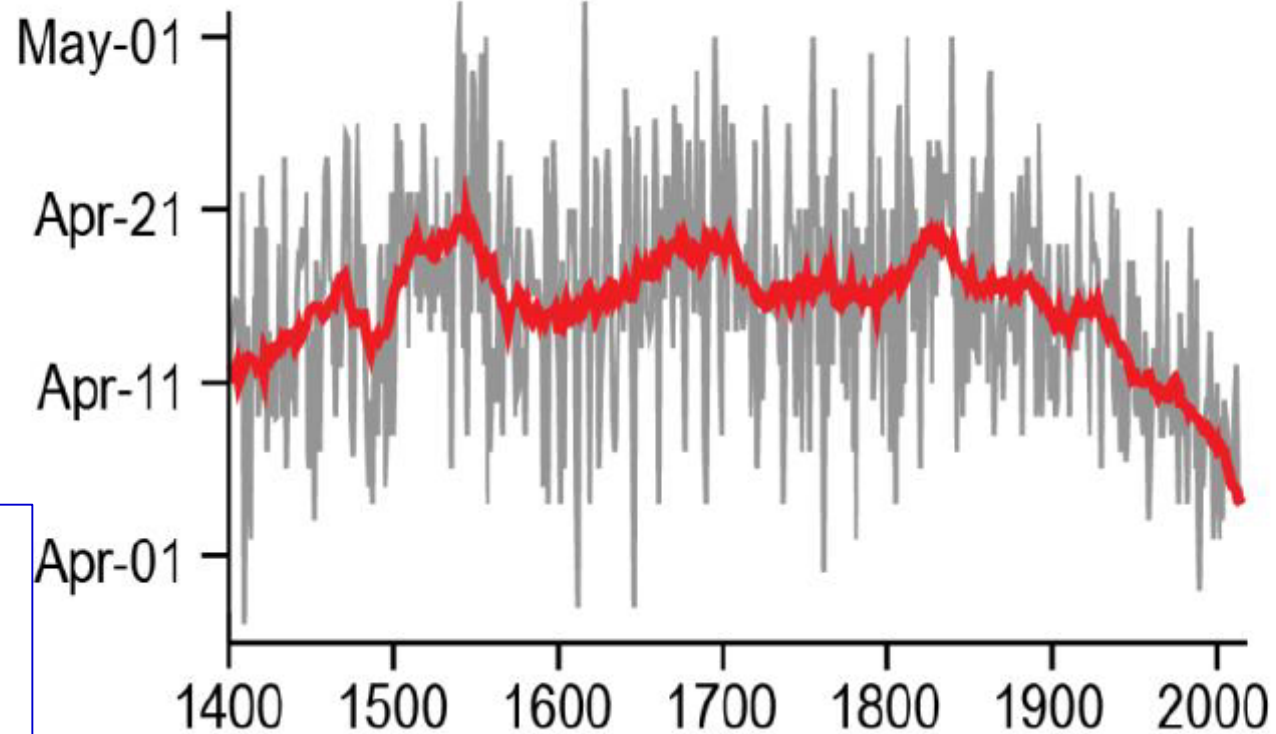
青い折れ線は、偏差の5年移動平均を示す。
赤い直線は、長期的な変化傾向を示す。



京都における猛暑日 (日最高気温 35°C 以上)の年間日数



(a) Cherry blossom peak bloom in Kyoto, Japan



京都における桜の満開日の変化
(IPCC, 2022 WG2 report)

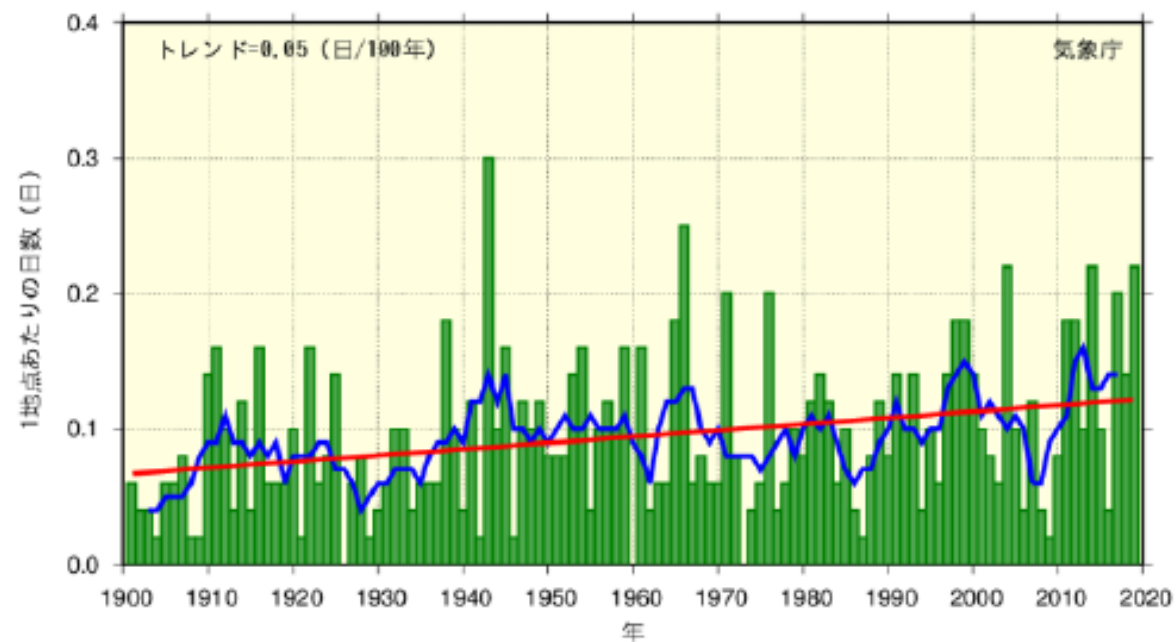


図 4.1 日降水量 200 mm 以上の大雨の年間日数の経年変化 (1901～2019 年)

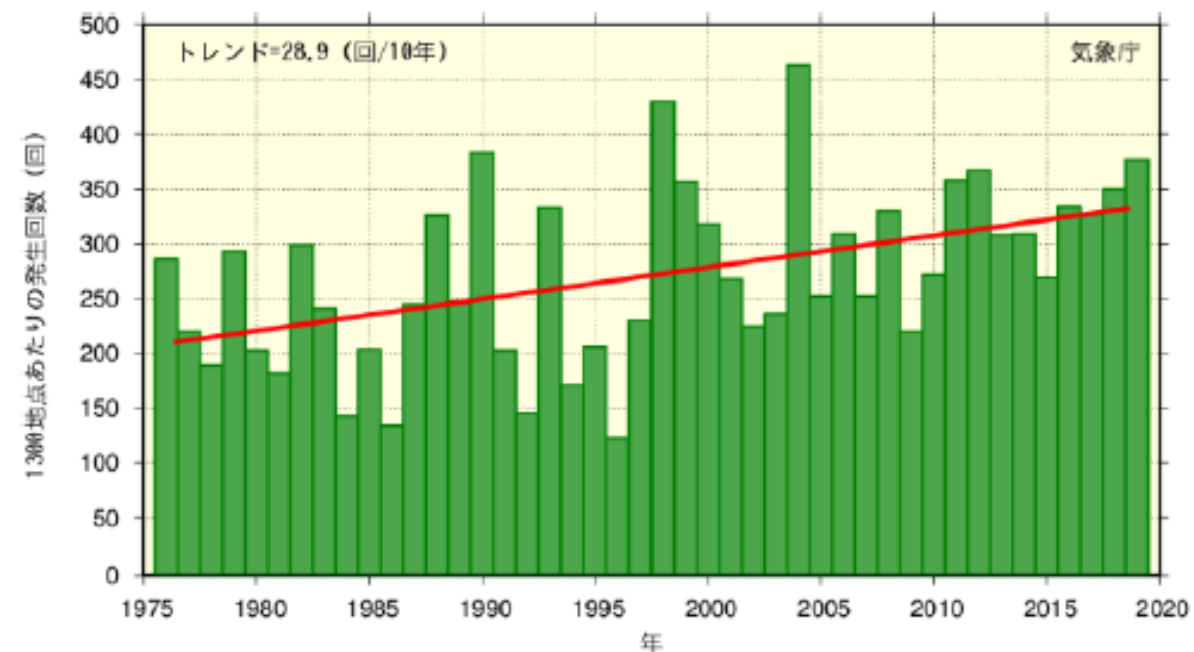
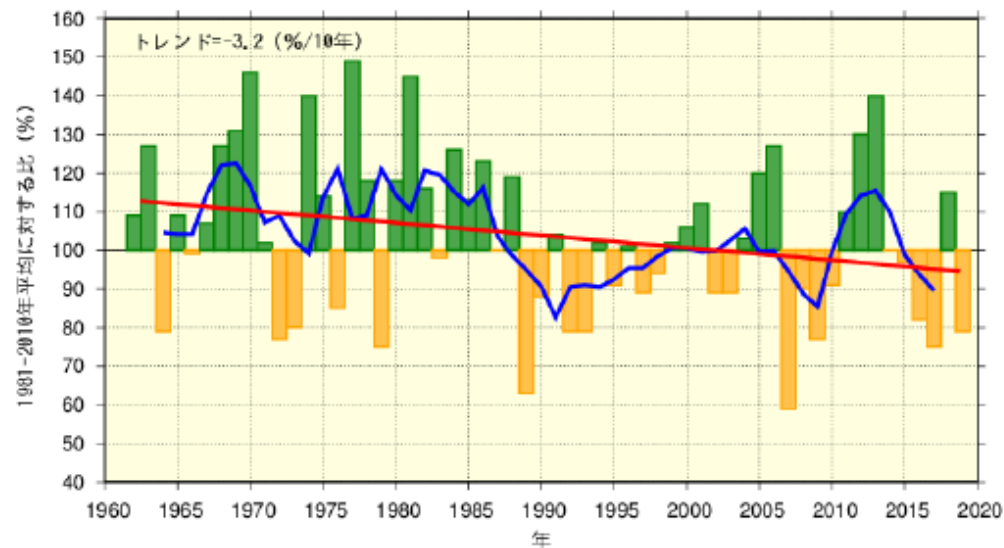
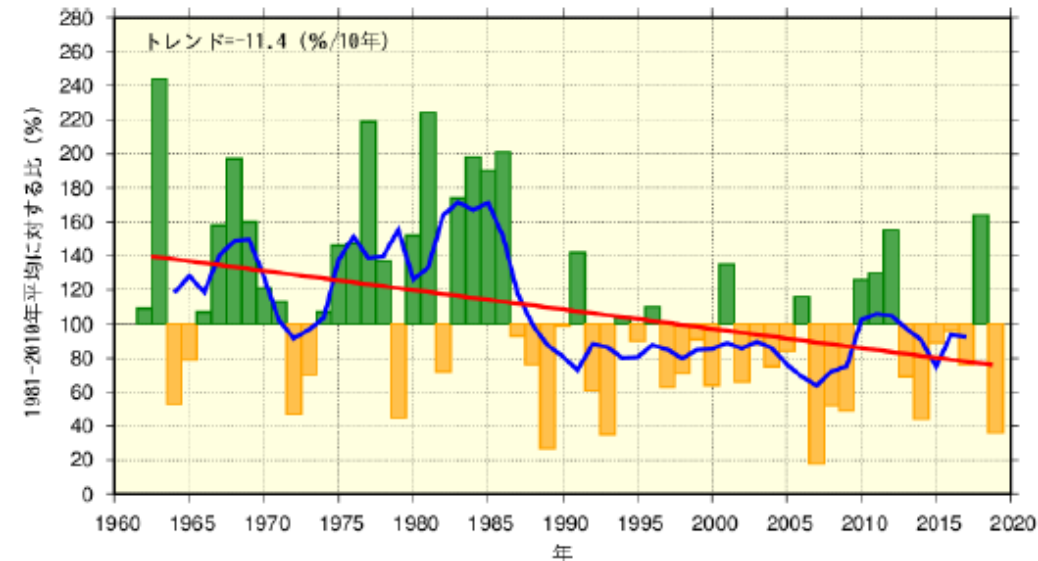


図 4.2 1 時間降水量 50 mm 以上の短時間強雨の年間発生回数の経年変化 (1976～2019 年)

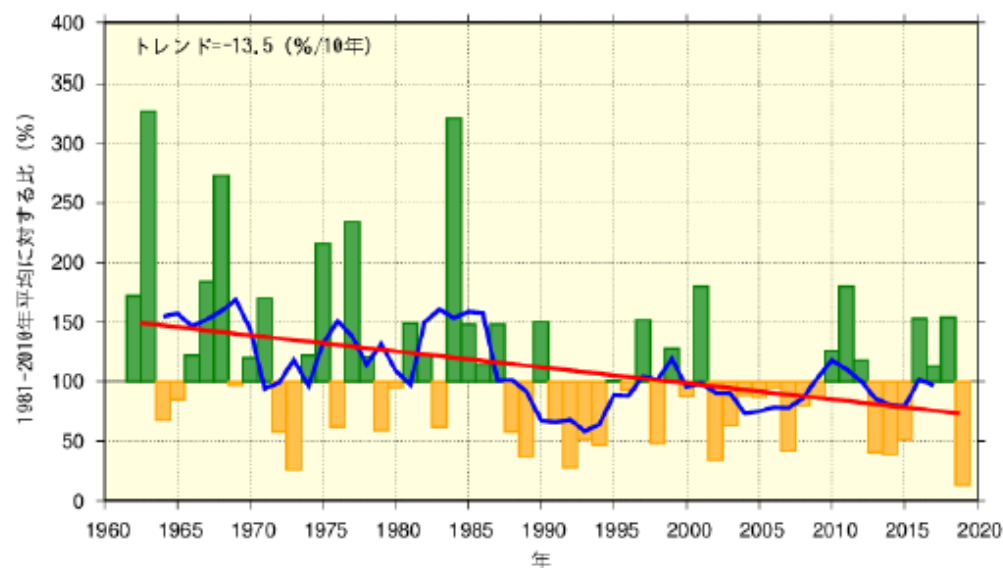
北日本 日本海側



東日本 日本海側



西日本 日本海側



棒グラフは各地域の観測地点（表 6.1 参照）での各年の年最深積雪の基準値に対する比を平均した値を示す。緑（黄）の棒グラフは基準値と比べて多い（少ない）ことを表す。太線（青）は比の 5 年移動平均値、直線は長期変化傾向（この期間の平均的な変化傾向）を示す。基準値は 1981～2010 年の 30 年平均値。各地域の具体的な範囲は詳細版の図 付録 1.2.4 を参照。

図 6.1 日本の年最深積雪の基準値に対する比の経年変化（1962～2019 年）

将来予測まとめ 21世紀末の日本の気候

21世紀末の日本は、20世紀末と比べ...

※ 黄色は2°C上昇シナリオ (RCP2.6)、
紫色は4°C上昇シナリオ (RCP8.5) による予測

年平均気温が約1.4°C/約4.5°C上昇

海面水温が約1.14°C/約3.58°C上昇



猛暑日や熱帯夜はますます増加し、
冬日は減少する。



温まりやすい陸地に近いことや暖流の影響で、
予測される上昇量は世界平均よりも大きい。

降雪・積雪は減少

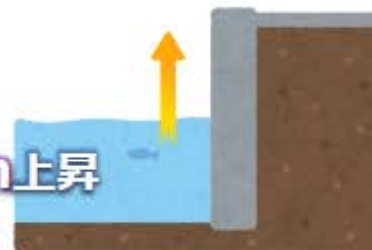
雪ではなく雨が降る。
ただし大雪のリスクが
低下するとは限らない。



激しい雨が増える

日降水量の年最大値は
約12% (約15 mm) / 約27% (約33 mm) 増加
50 mm/h以上の雨の頻度は 約1.6倍/約2.3倍に増加

沿岸の海面水位が
約0.39 m/約0.71 m上昇



3月のオホーツク海海水面積は
約28%/約70%減少



【参考】4°C上昇シナリオ (RCP8.5) では、
21世紀半ばには夏季に北極海の海氷が
ほとんど融解すると予測されている。



強い台風の割合が増加
台風に伴う雨と風は強まる

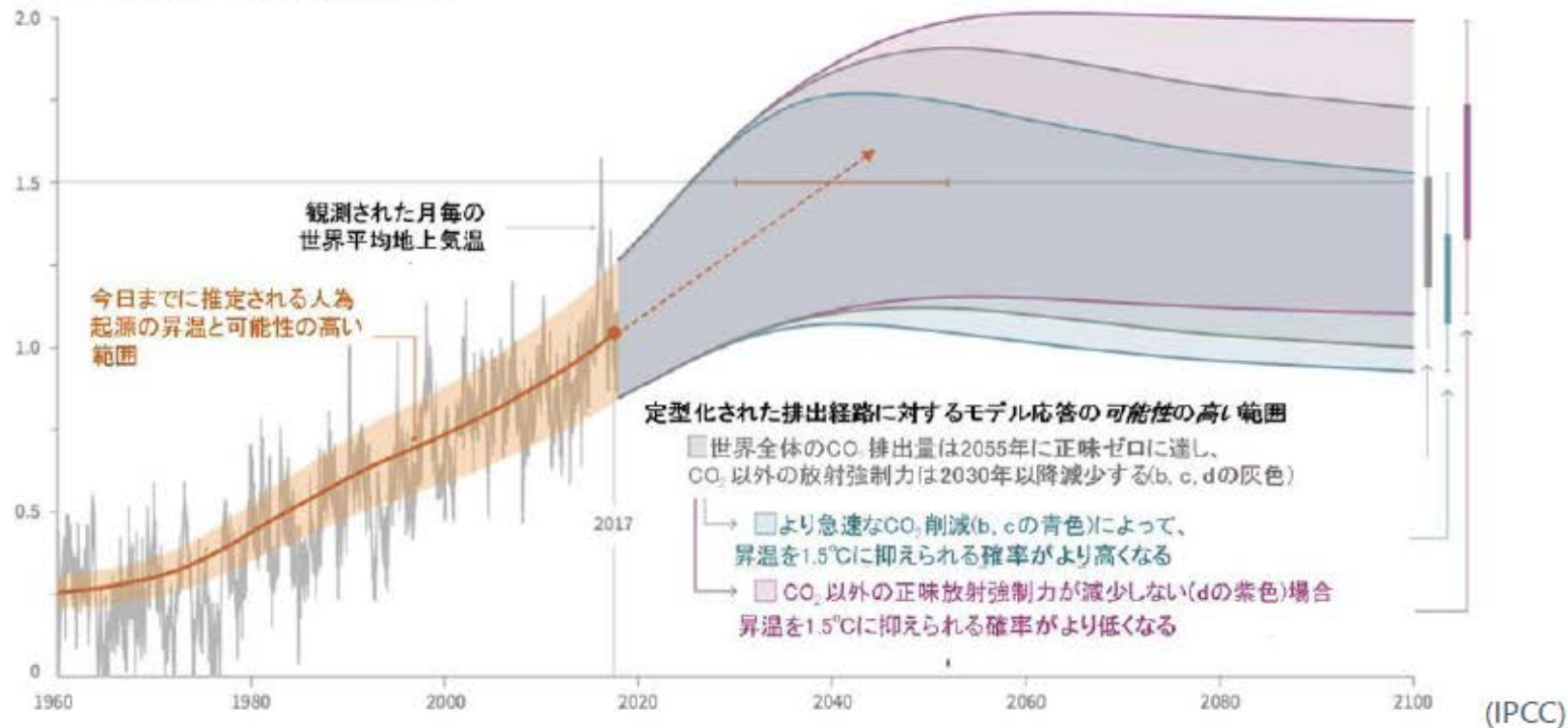
日本南方や沖縄周辺においても
世界平均と同程度の速度で
海洋酸性化が進行



IPCC 1.5°C特別報告書（2018）

- 地球温暖化が現在の速度で進行し続けると、2030～2052年の間に、工業化以前と比べた昇温量が1.5°Cに達する可能性が高い。
- 地球温暖化を1.5°Cに抑えるモデルでは、世界全体の人為起源二酸化炭素の正味排出量が、2030年までに2010年の水準から約45%減少し、2050年前後に正味ゼロに達する。
- 地球温暖化を2°Cに抑えるモデルでは、世界全体の人為起源二酸化炭素の正味排出量が、2030年までに2010年の水準から約25%減少し、2070年前後に正味ゼロに達する。

1850～1900年を基準とした地球温暖化(°C)

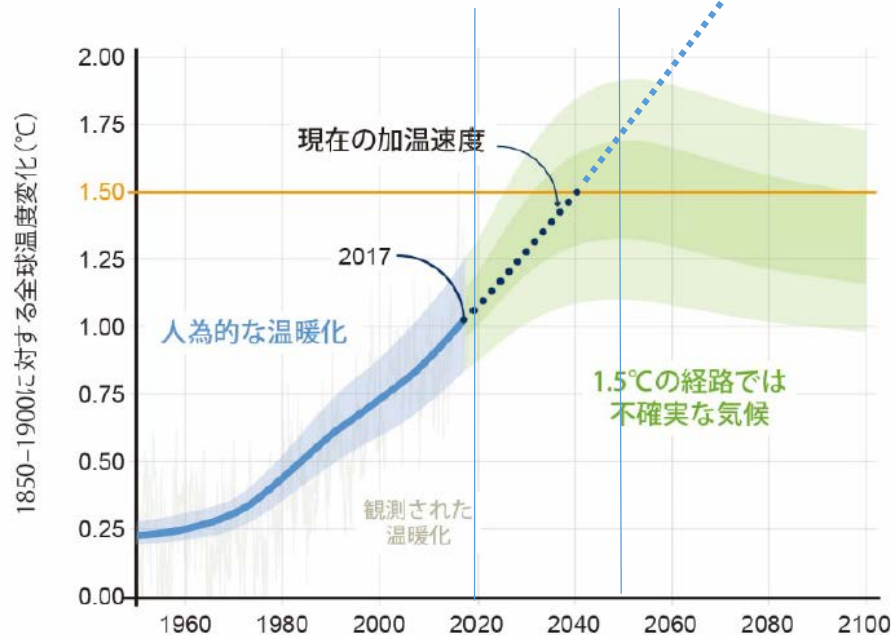


私たちは「地球温暖化」とその影響にどう立ち向かうべきか？

(次の一原雅子さんの講演をお聴きください)

FAQ1.2: どれだけ我々は1.5°Cに近づいているのだろうか？

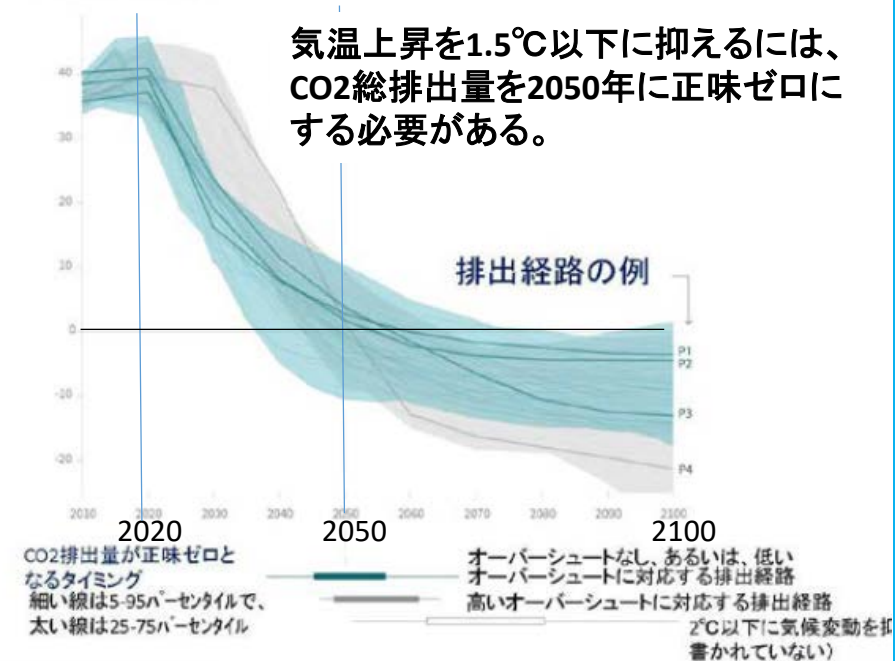
人為的な温暖化は、2017年に工業化以前のレベルよりも約1°C高くなった



世界総正味CO2排出量

10億トンCO2/年

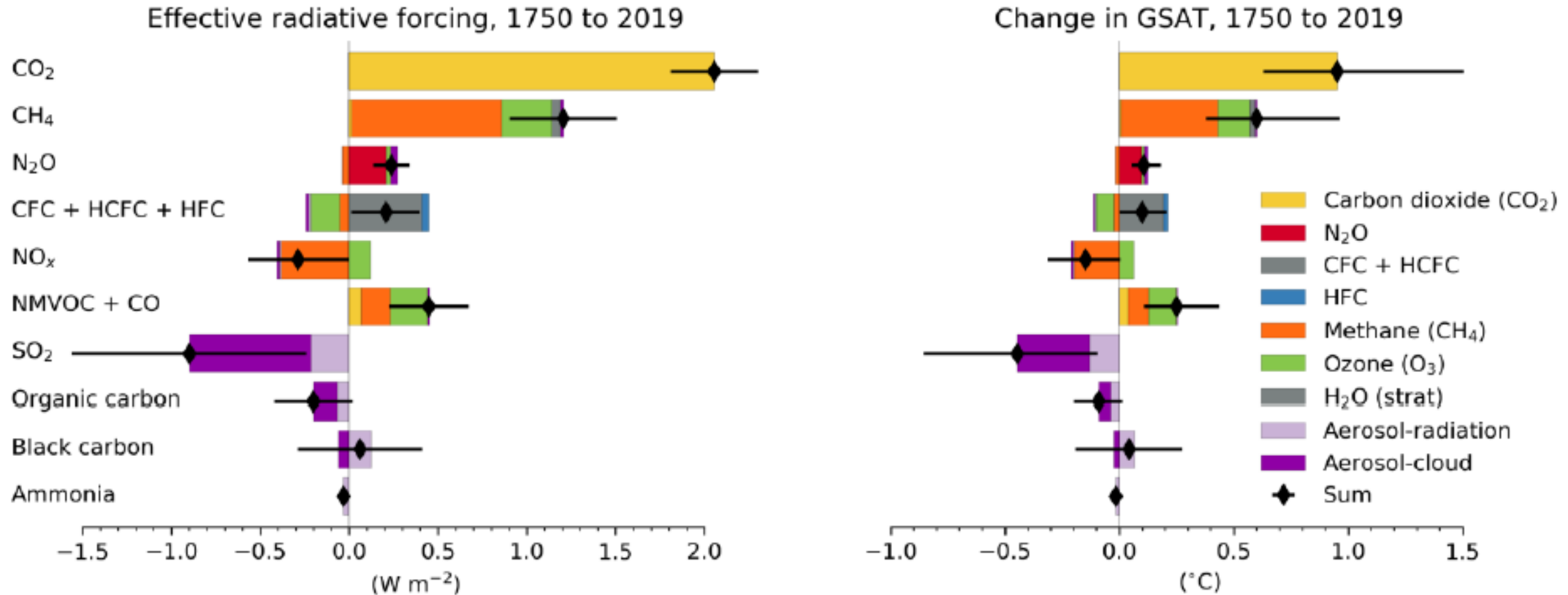
気温上昇を1.5°C以下に抑えるには、CO2総排出量を2050年に正味ゼロにする必要がある。



IPCC 「1.5°C特別報告」 (IPCC, 2019) より

補足のスライド

大気中の温室効果ガスとエアロゾルはどの程度地表面気温を 変化させているか



FAQ2.1: How is this global warming different to before?

Climate has always changed, but warming like that of recent decades has not been seen for millennia or longer



It is warming almost everywhere



It is warming rapidly



The warming reversed a long-term cooling



It has been a long time since it has been this warm

