

地球温暖化の最新知見と今後の見通し

渡部雅浩

東京大学大気海洋研究所

今年からのできごと

2021

8月 IPCC第一作業部会 第6次評価報告書公開
10月 真鍋淑郎先生 ノーベル物理学賞受賞
11月 COP26

2022

IPCC第二・第三作業部会・統合報告書

2023

パリ協定グローバルストックテイク

≈

2050

カーボンニュートラル達成？

地球温暖化の最新知見と今後の見通し



IPCC WGI AR6 —誰が書いたか—

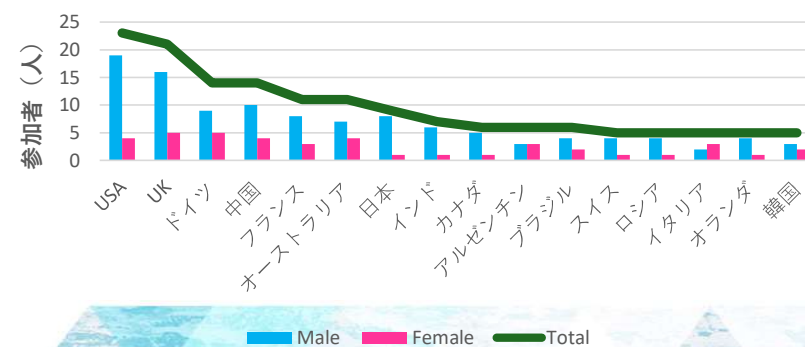
- 世界66カ国の科学者（執筆者、査読編集者）234名 + IPCC事務局

日本からの参加者



- 4回の執筆者会合（うち1回はオンライン）で、>14000の論文をもとに0次、1次、2次、最終ドラフトを作成
- ドラフトの各段階で、査読者（=科学者、政府関係者など）からのコメント（全体で>78000件！）を受けて改訂
- 日本からは10名（執筆者7名、査読編集者3名）

WGI AR6 CLAs/LAs

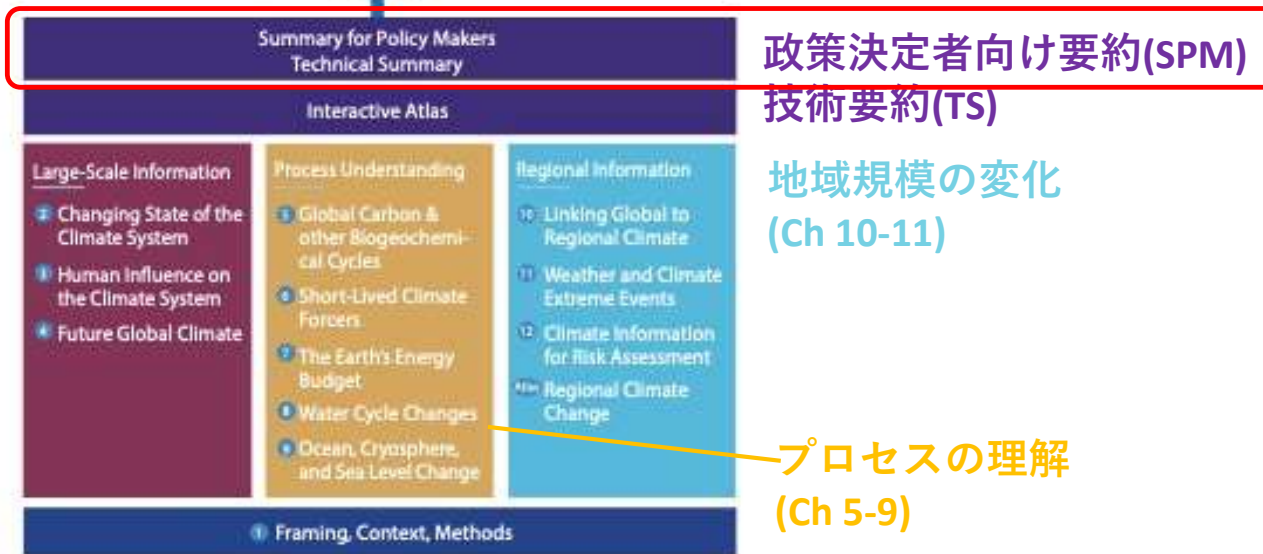


IPCC WGI AR6 一章の構成



この部分を主に解説します

全球規模の変化
(Ch 2-4)



政策決定者向け要約(SPM)

技術要約(TS)

地域規模の変化
(Ch 10-11)

プロセスの理解
(Ch 5-9)

枠組み・手法 (Ch1)

Ch1 Fig 1.1

IPCC WGI AR6 —その根拠—

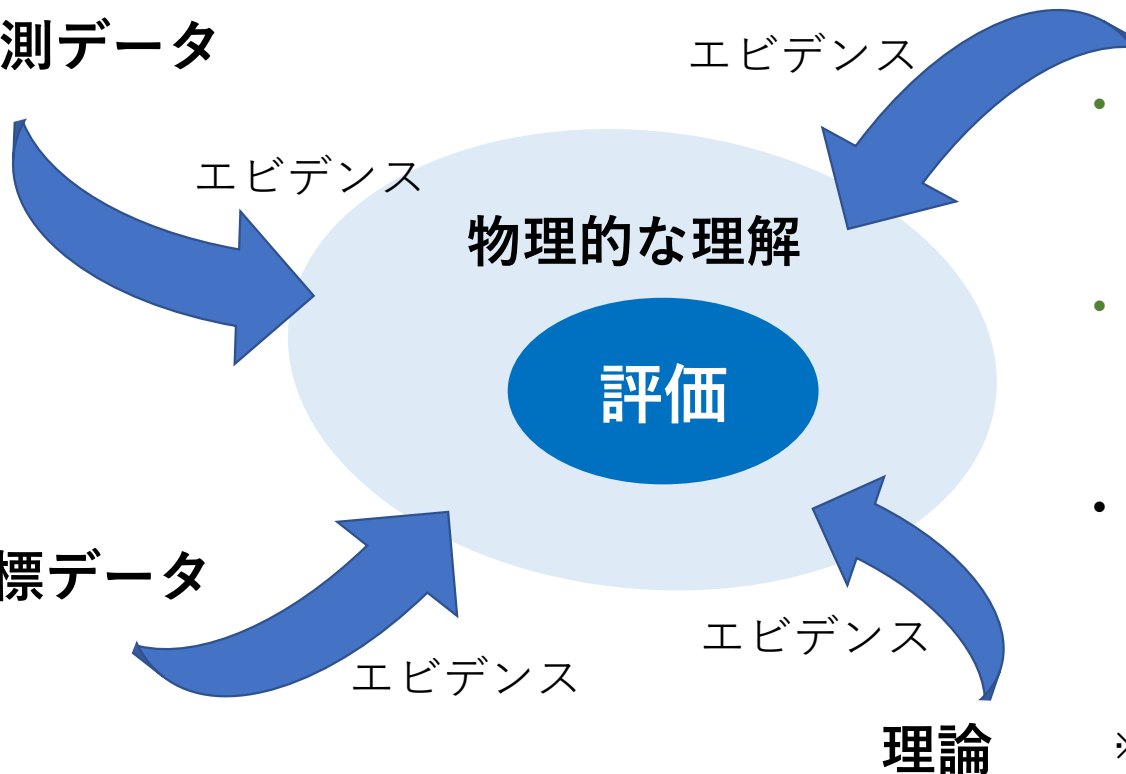
 **Multiple lines of evidence**

数値モデルによる
シミュレーションデータ

20世紀以降の観測データ

- 地表温度
- 大気再解析データ
- 大気質観測データ
- 海洋観測データ
- 陸域観測データ
- 雪氷観測データ

古気候の代理指標データ



- 気候モデル/地球システムモデルによる全球的变化
⇒ CMIP6



- 領域気候モデルによる地域的变化
⇒ CORDEX



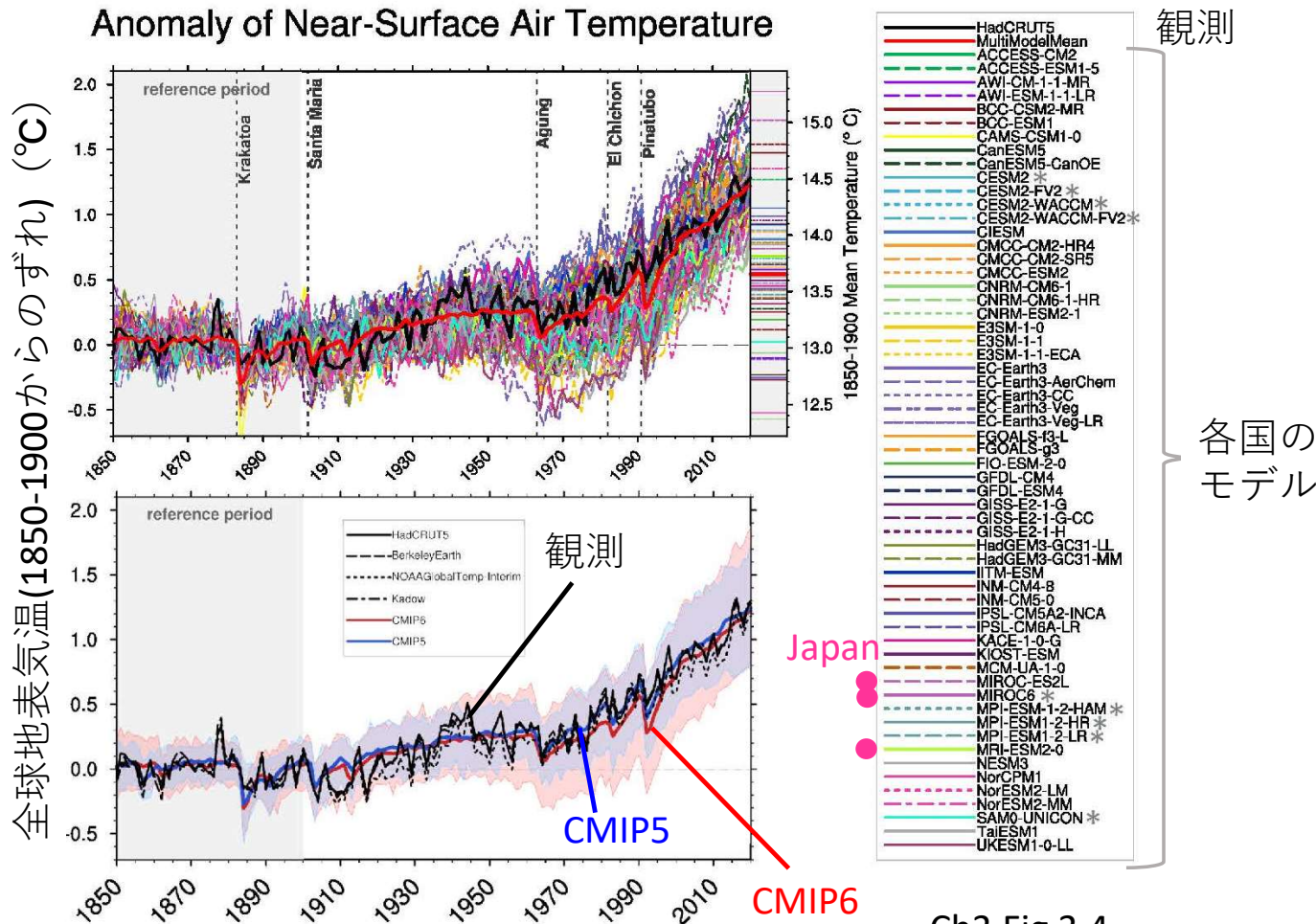
- 簡易モデルによる全球指標 (メトリック) の emulation

※ WCRP: 世界気候研究計画 (WMO傘下)

地球システムモデルは過去を再現するか

個々のモデル
結果と観測値

モデル
アンサンブル
と観測値



観測

各国の
モデル



CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6)

共通の実験プロトコル・境界条件データで実施した膨大な全球気候シミュレーション

- ・ベース実験 (産業革命前)
- ・1850～2015年 (過去再現)
- ・2016～2100年 (将来実験)

モデリングセンター
19 (CMIP5) ⇒ 28 (CMIP6)

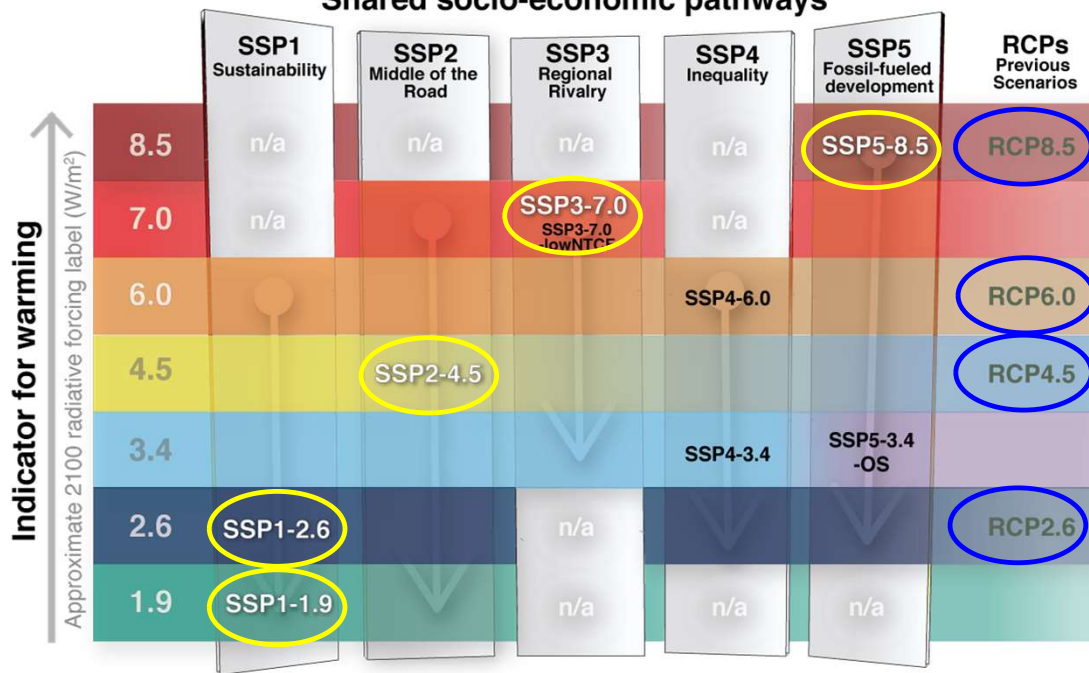
Ch3 Fig 3.4

将来「予測」の排出シナリオ

5つの社会経済シナリオ

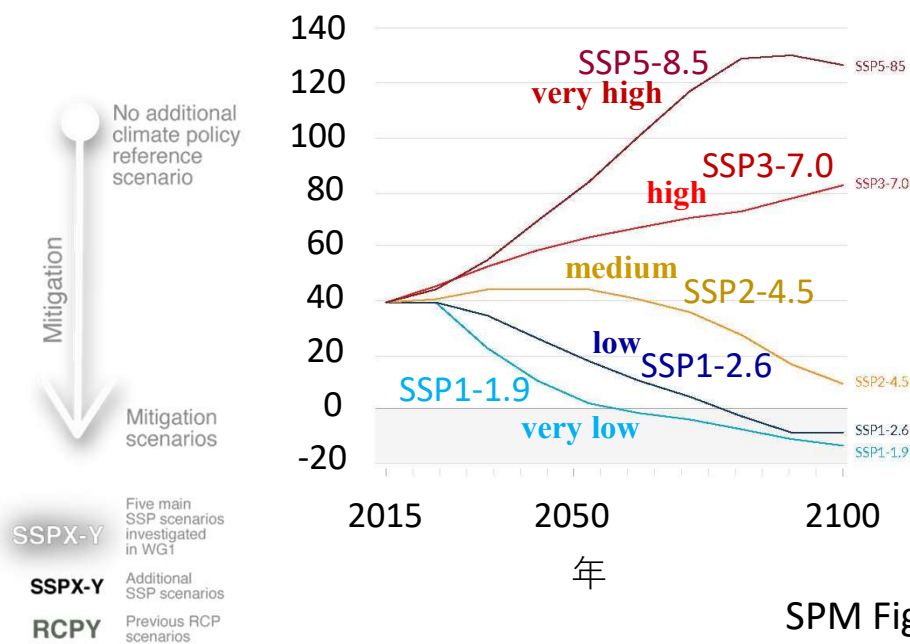
Shared socio-economic pathways

放射強制力の大きさ



Ch1 Box1.4 Fig 1

炭素排出量 (Gt CO₂ per year)

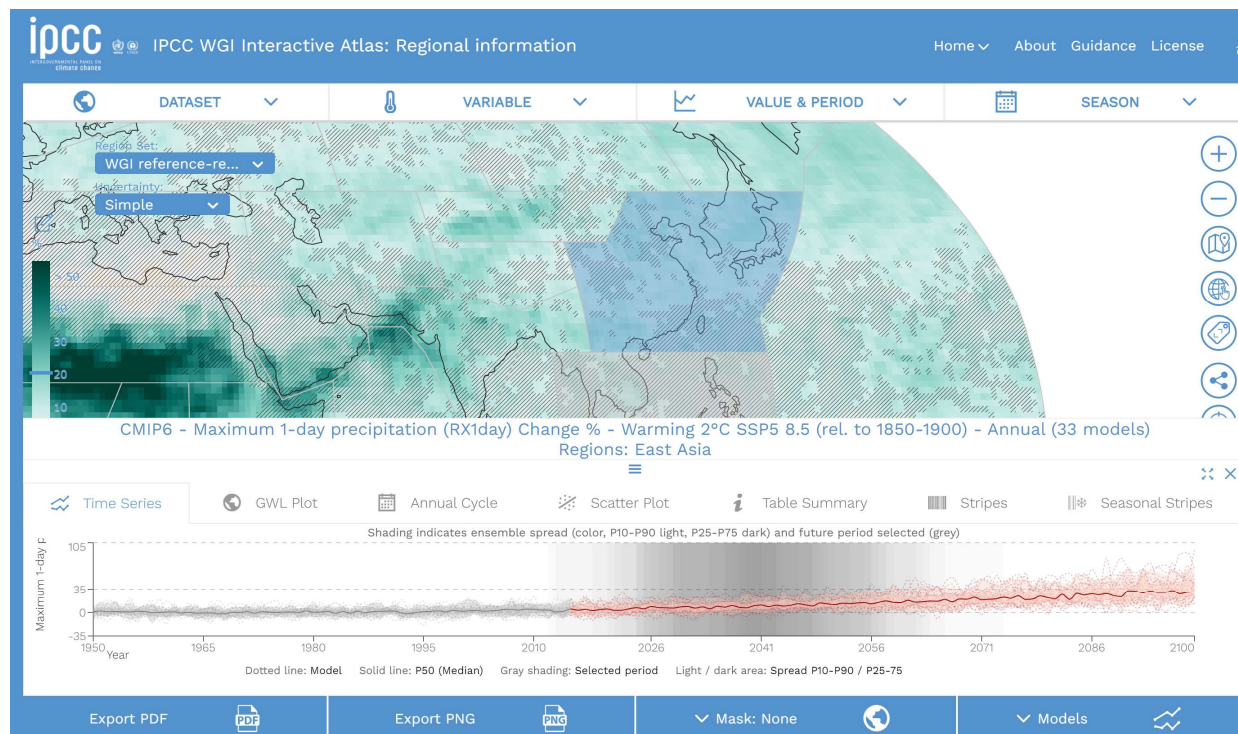


SPM Fig 4

- 2050カーボンニュートラル⇐SSP1-1.9
- 中庸シナリオ = SSP2-4.5⇐RCP4.5
- 最悪シナリオ = SSP5-8.5⇐RCP8.5

手っ取り早くデータを見たい方にはー

IPCC WGI インタラクティブ・アトラスーオンデマンドで温暖化予測情報を見られるー



<https://interactive-atlas.ipcc.ch/>

AR5以降なにが分かったか

Summary for Policymakers (SPM, 政策決定者向け要約)

4つの大項目について数個ずつ、主なポイント (headlines) を提示

 *The Current State of the Climate*
いま気候はどうなっているか？

 *Our Possible Climate Futures*
将来の気候はどうなっていくか？

 *Climate Information for Risk Assessment & Regional Adaptation*
リスク評価・地域の適応のための気候情報は？

 *Limiting Climate Change*
気候の変化をおさえるには？

AR5以降なにが分かったかーSPMからー



The Current State of the Climate

It is unequivocal that human influence has warmed the atmosphere, ocean and land. Widespread and rapid changes in the atmosphere, ocean, cryosphere and biosphere have occurred.

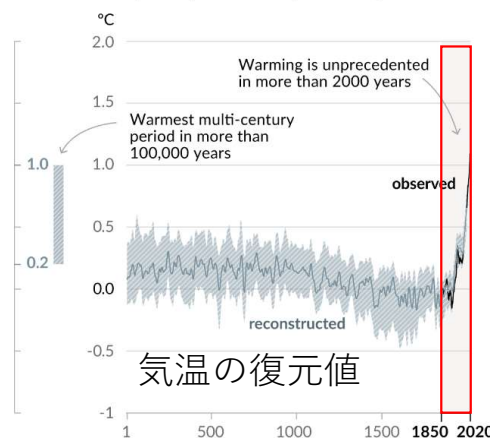
人間活動が気候システムの温暖化および広範で急速な気候変化をもたらしてきたことは疑う余地がない。

前回は一
・温暖化していることは「疑う余地がない」
・人間活動の影響は「可能性が極めて高い」

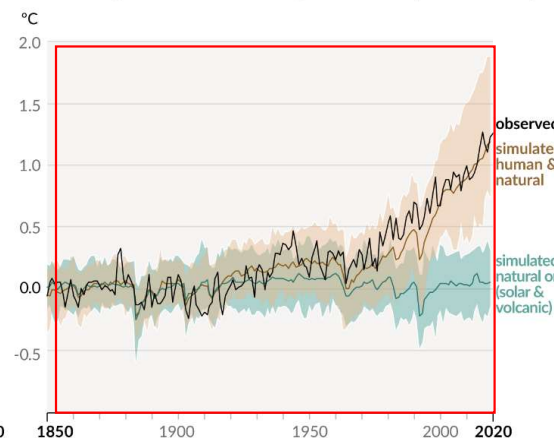
最近50年間に観測された気温上昇は、過去2000年のあいだに見られたことのないスピードである

Changes in global surface temperature relative to 1850-1900

a) Change in global surface temperature (decadal average) as reconstructed (1-2000) and observed (1850-2020)



b) Change in global surface temperature (annual average) as observed and simulated using human & natural and only natural factors (both 1850-2020)



観測値
CMIP6モデル平均
(全強制)
CMIP6モデル平均
(自然強制のみ)

SPM Fig 1

AR5以降なにが分かったかーSPMからー



The Current State of the Climate

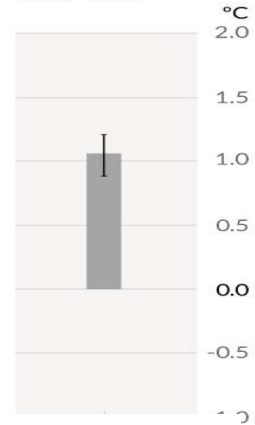
It is unequivocal that human influence has warmed the atmosphere, ocean and land. Widespread and rapid changes in the atmosphere, ocean, cryosphere and biosphere have occurred.

人間活動が気候システムの温暖化および広範で急速な気候変化をもたらしてきたことは疑う余地がない。

2010-2019年の
全球表面温度は
1850-1900年に比べ
+1.06 [0.88-1.21]°C

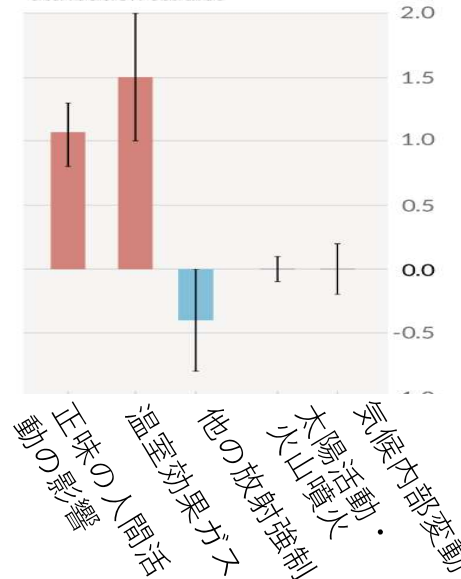
(気象庁統計では
2020年の年平均値
は**+1.2** °C)

a) Observed warming
2010-2019 relative to
1850-1900



2010-2019年
の気温変化
(観測値)

b) Aggregated contributions to
2010-2019 warming relative to
1850-1900, assessed from
attribution studies



温室効果ガスは1.0-2.0°Cの
温暖化、エアロゾルなどは
0.8-0.0°Cの寒冷化
⇒正味の人間活動の寄与は
+1.07 [0.8-1.30]°C

SPM Fig 2

AR5以降なにが分かったかーSPMからー



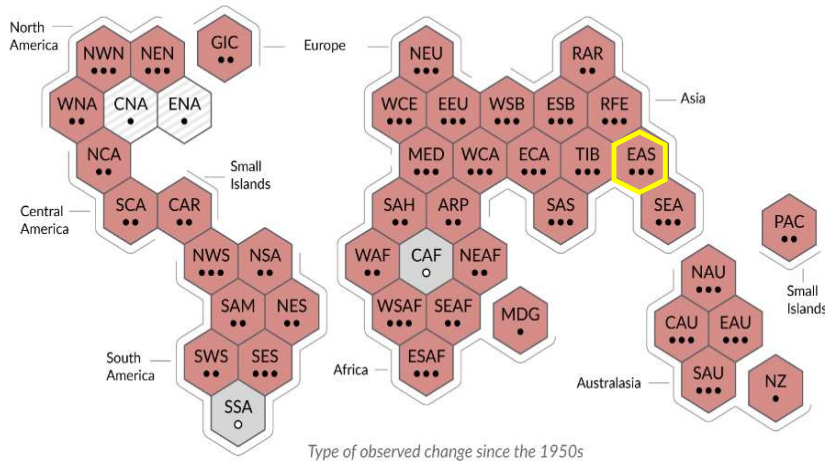
The Current State of the Climate

Human-induced climate change is already affecting many weather and climate extremes in every region across the globe. Evidence of observed changes in extremes such as heatwaves, heavy precipitation, droughts, and tropical cyclones, and, in particular, their attribution to human influence, has strengthened since AR5.

人間活動が引き起こす気候変化は、既に世界の全地域の極端気象（熱波、豪雨、干ばつ、熱帯低気圧など）に影響している。

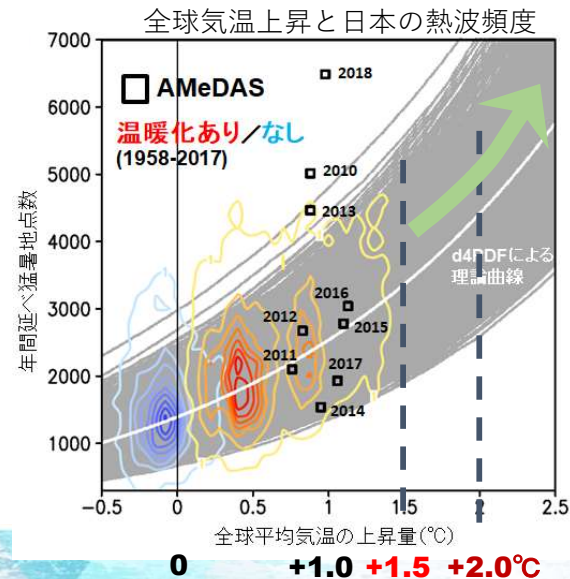
観測された高温事象に対する人間活動の影響

- Type of observed change in hot extremes
- Increase (41) 増加
 - Decrease (0) 減少
 - Low agreement in the type of change (2)
 - Limited data and/or literature (2)
- Confidence in human contribution to the observed change
- High
 - Medium
 - Low due to limited agreement
 - Low due to limited evidence



SPM Fig 3

個々の異常気象に対する温暖化の寄与推定 (イベントアトリビューション研究)



Imada et al. (2019 SOLA)



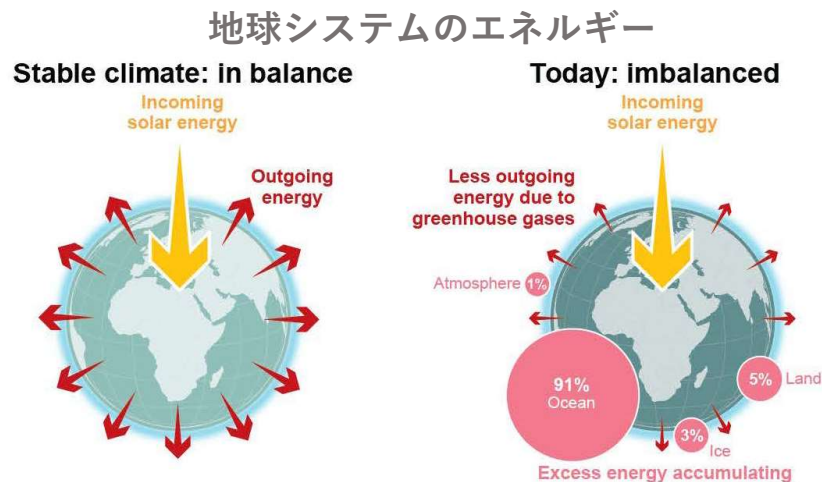
AR5以降なにが分かったかーSPMからー



The Current State of the Climate

Improved knowledge of climate processes, paleoclimate evidence and the response of the climate system to increasing radiative forcing

気候プロセス、古気候、および放射強制に対する気候システムの応答に関する理解が進んだ結果



放射強制因子の増加により1750-2019年に蓄えられたエネルギーは+2.72 W/m²でAR5の推定（2011年まで）よりも**19%増えている**

1901-2018年の海面上昇は20 [15-25] cm。
1971年以降は、50%が海洋熱膨張、22%が山岳氷河の損失、20%が氷床融解で説明される

Ch7 FAQ7.1 Fig 1

AR5以降なにが分かったかーSPMからー



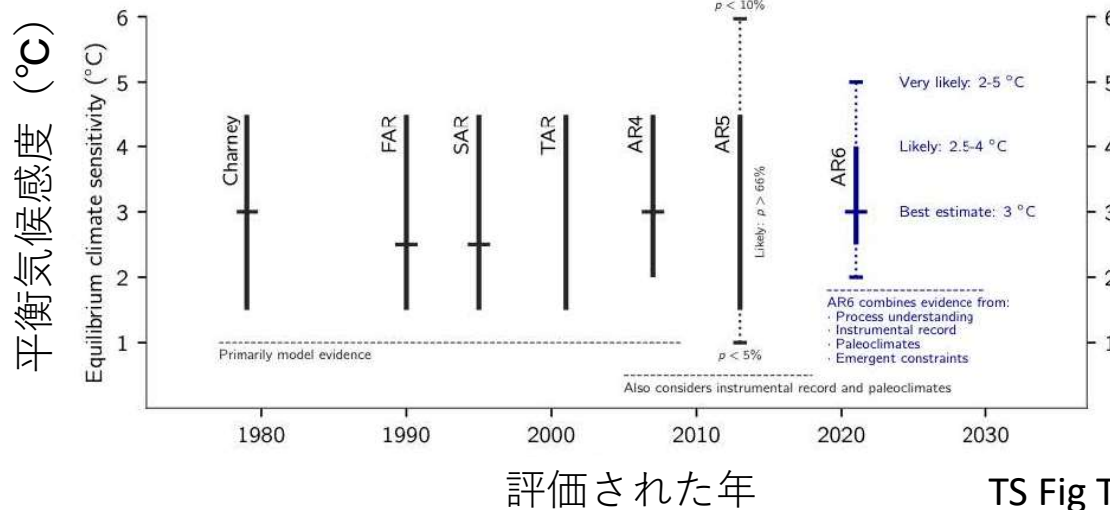
The Current State of the Climate

Improved knowledge of climate processes, paleoclimate evidence and the response of the climate system to increasing radiative forcing gives a best estimate of equilibrium climate sensitivity of 3°C with a narrower range compared to AR5.

気候感度の66%幅ー
 ・ AR5: 1.5~4.5°C
 ・ AR6: 2.5~4°C (半減)
 ⇒ TCREの推定も確実性を増した (後述)

気候プロセス、古気候、および放射強制に対する気候システムの応答に関する理解が進んだ結果、平衡気候感度の最良推定値は3°Cと評価され、その推定幅はAR5よりも狭まった。

最初期(1979)からAR6までの気候感度推定値



TS Fig TS.16



国際研究グループによる気候感度再評価(Sherwood et al. 2020 Rev Geophys)が重要な役割を果たした



AR5以降なにが分かったかーSPMからー



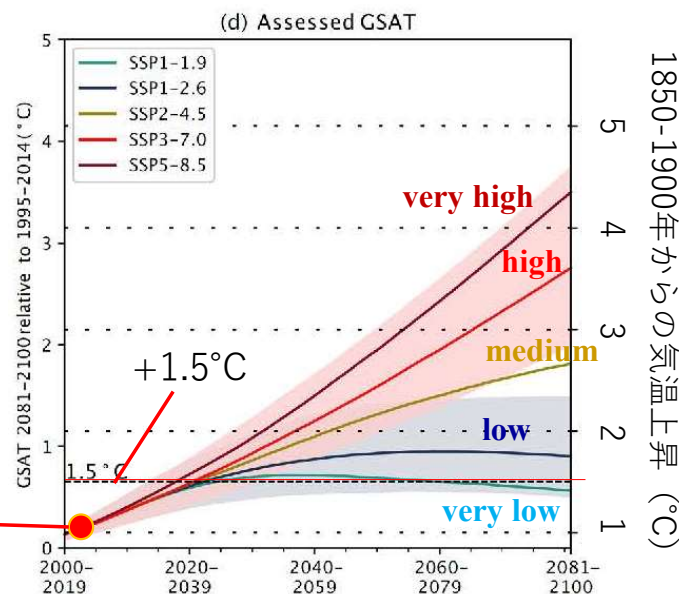
Our Possible Climate Futures

Global warming of 1.5°C and 2°C will be exceeded during the 21st century unless deep reductions in CO₂ and other greenhouse gas emissions occur in the coming decades.

今後数十年の間に温室効果ガス排出削減を強力に進めない限り、今世紀末までに温暖化レベルは+1.5°Cおよび+2°Cを越える。

CMIP6のSSP実験を
気候感度の評価に
基づき補正したもの

2011-2020年
+1.09°C



(discouraging)

すべてのシナリオで、今後20年（2021-2040年）に温暖化レベル+1.5°Cを越える可能性が高い

(encouraging)

しかし、**最低位シナリオ**では、一時的に+1.5°Cを超えても、その後+1.5°C未満の状態に落ち着く
⇒ **カーボンニュートラルの必要性を確認**

自然変動による増減は±0.25°C (90%範囲) があるので、近未来に特定の年が+1.5°Cを越えることはあり得る⇒それは温暖化レベルが+1.5°Cを超えたことを意味しない

SPM Table 1, TS Cross-Section Box Fig 1, Ch4 Fig 4.11

AR5以降なにが分かったかーSPMからー



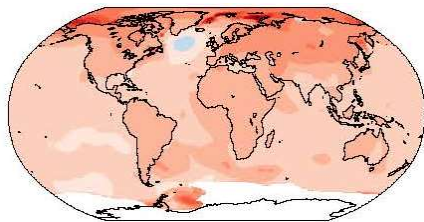
Our Possible Climate Futures

Many changes in the climate system become larger in direct relation to increasing global warming. They include increases in the frequency and intensity of hot extremes, marine heatwaves, and heavy precipitation, agricultural and ecological droughts in some regions, proportion of intense tropical cyclones as well as reductions in Arctic sea ice, snow cover and permafrost.

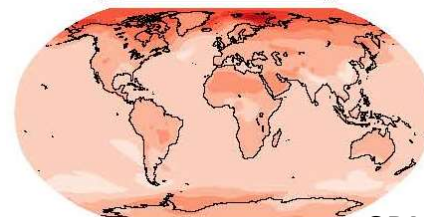
熱波、豪雨、干ばつ、強い台風、北極海氷・積雪・永久凍土などの損失といった気候システムの変化の多くは温暖化の進行とともに大きくなる。

全球が1°C温暖化した時の気温変化

観測
データ



CMIP6
モデル

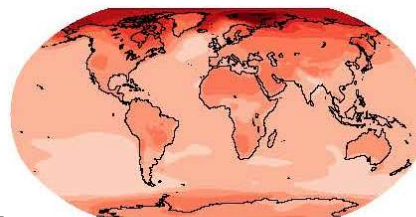


SPM Fig 5

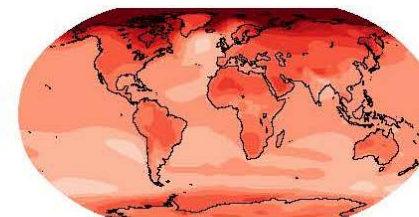
温暖化のパターン（北極温暖化増幅、陸の昇温など）は温暖化のレベルによらずおよそ共通している

異なる温暖化レベルでの気温変化

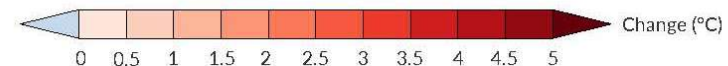
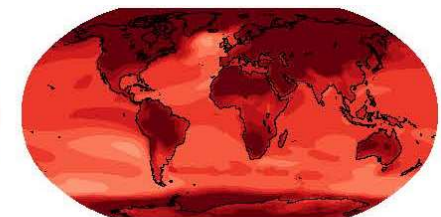
+1.5°C



+2°C



+4°C



AR5以降なにが分かったかーSPMからー

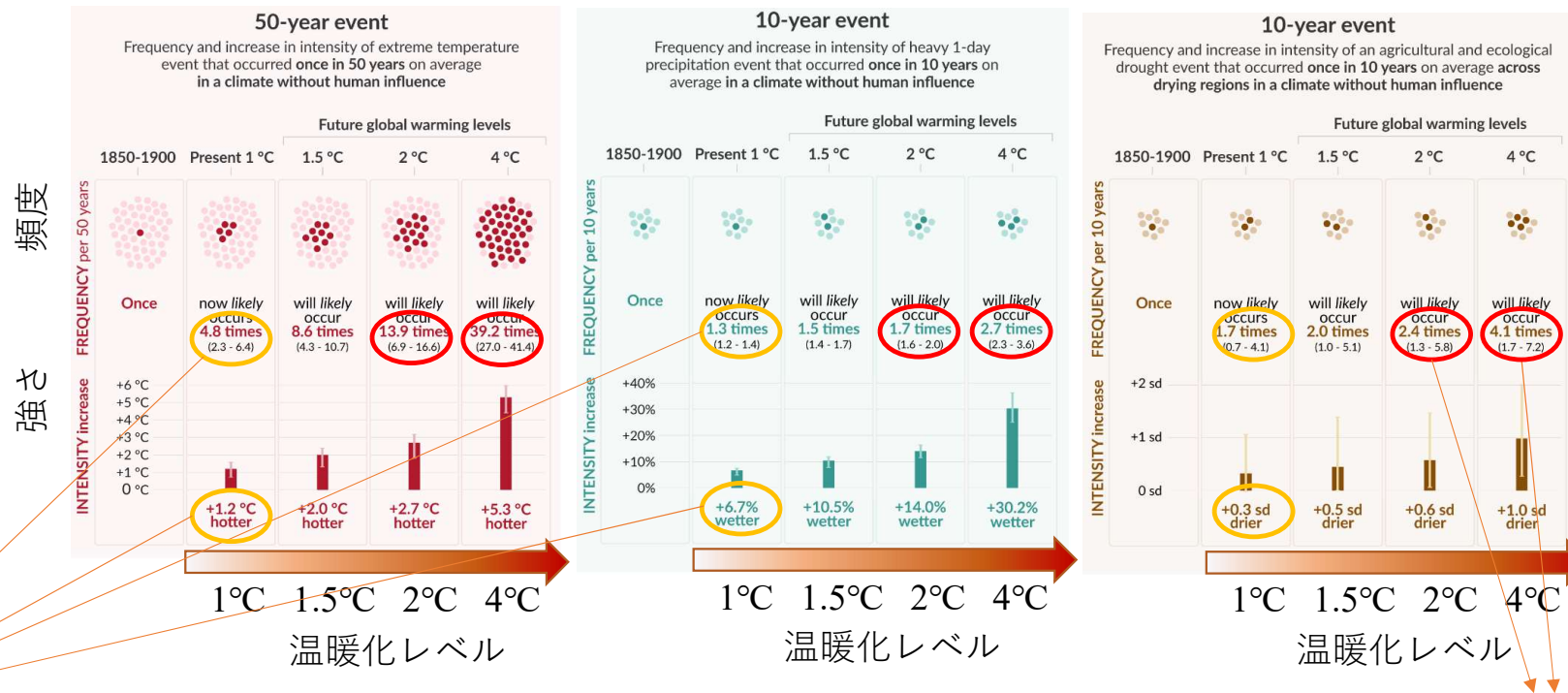


Our Possible Climate Futures

50年に一度の猛暑

10年に一度の豪雨

10年に一度の干ばつ（農業生態）



人間活動の影響は、現在の温暖化レベルでも既に現れている

温暖化レベルに比例して、頻度・強度ともに大きくなる

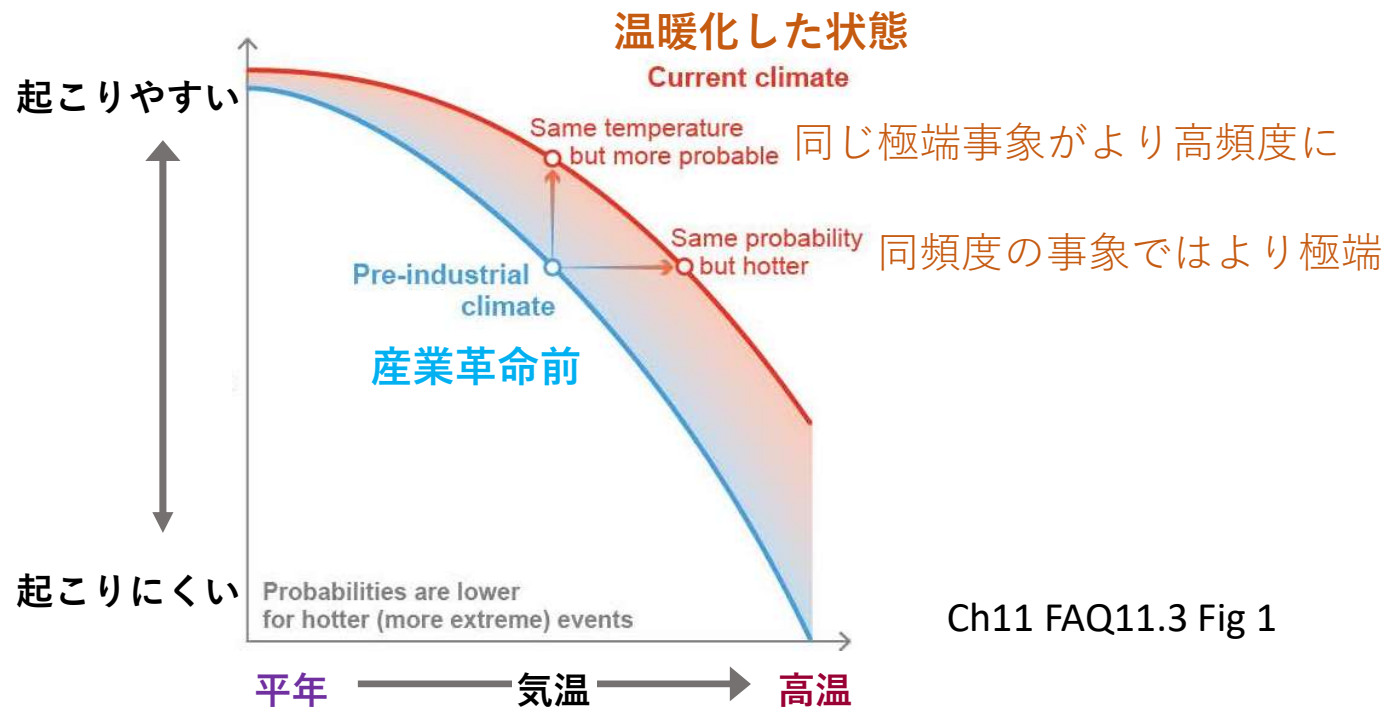
SPM Fig 6

AR5以降なにが分かったかーSPMからー



Our Possible Climate Futures

温暖化レベルに比例して、頻度・強度ともに大きくなるーということ？



Ch11 FAQ11.3 Fig 1

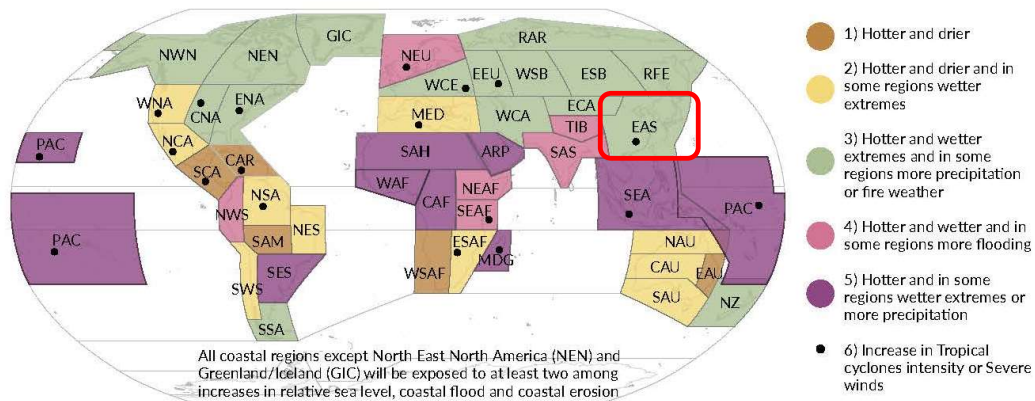
AR5以降なにが分かったかーSPMからー

Climate Information for Risk Assessment & Regional Adaptation

With further global warming, every region is projected to increasingly experience concurrent and multiple changes in climatic impact-drivers. Changes in several climatic impact-drivers would be more widespread at 2°C compared to 1.5°C global warming and even more widespread and/or pronounced for higher warming levels.

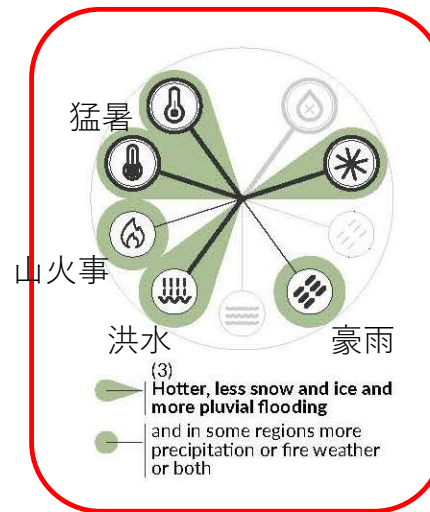
温暖化が進めば、すべての地域で複数の気候的な影響駆動要因 (CIDs) がさらに変化する。いくつかのCIDsは、1.5°Cよりも2°C昇温した時の方が、変化がより広範に生じる。

CIDの組み合わせによるクラスター分類 (2°C昇温時)



CID = 社会や生態系に影響する物理気候の状態 (平均気候や極端気象) の総称

TS Fig TS.22



CIDsの組み合わせや影響の度合いは地域により異なる

複合事象 (compound event) が増える可能性も

日本の気候変動2020

—大気と陸・海洋に関する観測・予測評価報告書—

ポイント：

- 国内地域ごとの気候・気象の変化が分かりやすくまとめられている
- 熱波や大雨の指標も国内でよくつかわれるものを用いている
- 2022年には、対応する「日本の気候予測データセット」を公開予定

注意点：

- AR6以前にまとめたため、AR5時のシミュレーション（RCPシナリオ）をベースにしている
- 1.5°C温暖化時の評価もない
⇒ 次回報告書で更新予定

将来予測まとめ

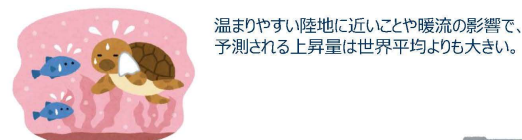
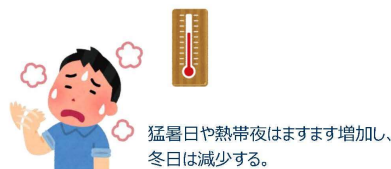
21世紀末の日本は、20世紀末と比べ...

年平均気温が約1.4°C/約4.5°C上昇

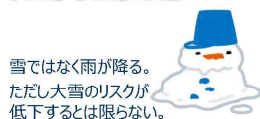
海面水温が約1.14°C/約3.58°C上昇

文部科学省 文化、スポーツ、科学技術部 気象庁
MINISTRY OF EDUCATION, CULTURE, SPORTS, SCIENCE AND TECHNOLOGY JAPAN Japan Meteorological Agency

※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



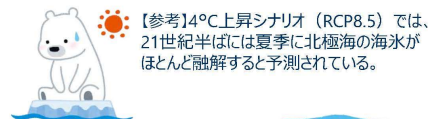
降雪・積雪は減少



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氷面積は約28%/約70%減少



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

※この資料において「将来予測」は、特段の説明がない限り、日本全国について、21世紀末時点の予測を20世紀末又は現在と比較したものを示す。

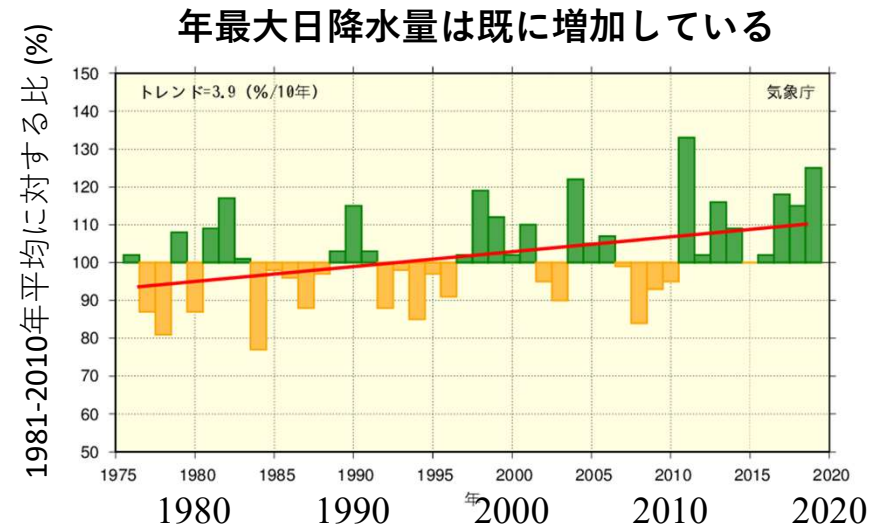
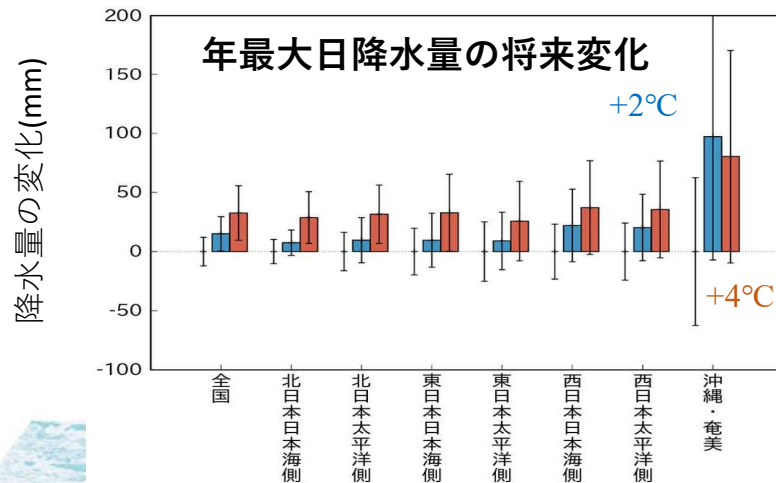
<https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ccj/index.html>

日本の極端気象の変化は？

必ず聞かれるだろう質問

Q 50年に一度の猛暑や10年に一度の豪雨って日本ではどうなる？

A 日本の極端気象の指標（猛暑日、年最大日降水量、日降水量200ミリ以上の年間日数、など）は独自のものなので、一概に比較はできません。が、それらの頻度や強度が増すということ自体はAR6と整合しています。



	+2°C	+4°C
日降水量200ミリ以上の年間日数	約1.5倍	約2.3倍
時間降水量50ミリ以上の頻度	約1.6倍	約2.3倍
年最大日降水量	約+12%	約+27%

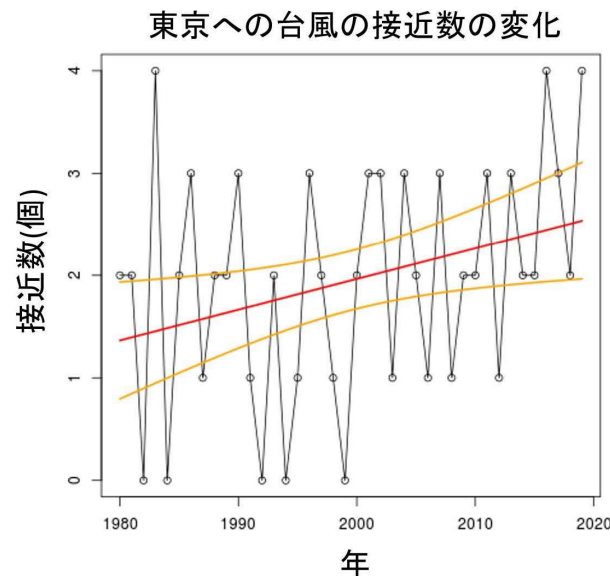
日本の気候変動2020

AR5以降なにが分かったかーSPMからー



The Current State of the Climate

A3.4 強い熱帯低気圧（カテゴリ3～5）の発生割合は過去40年間で増加しており、北西太平洋の熱帯低気圧がピーク強度に達する緯度が北に遷移している可能性が高い。これらの変化は内部変動だけでは説明できない（確信度が中程度）。全てのカテゴリの熱帯低気圧の頻度に長期（数十年から百年）変化傾向があることの確信度は低い。イベント・アトリビューション研究と物理的な理解は、人為起源の気候変動は熱帯低気圧に伴う大雨を増加させることを示すが（確信度が高い）、データが限られているため、世界的なスケールで過去の変化傾向を明瞭に検出することは困難である。



台風はより強く、移動速度が遅くなる傾向も
⇒ ただし、観測データからはこれらの変化がどこまで温暖化で説明されるかは不確実

Yamaguchi et al. (2020)

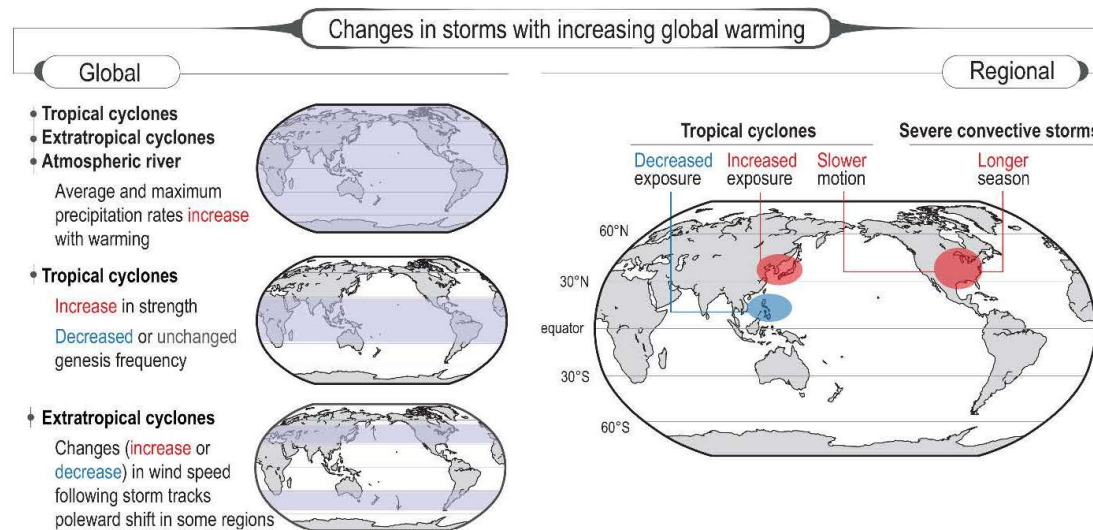
Courtesy of I Takayabu

AR5以降なにが分かったかーSPMからー



Our Possible Climate Futures

B2.4 地球温暖化の進行に伴い、大雨は多くの地域で強く、より頻繁になる可能性が非常に高い。地球規模では、日降水量で見た極端な降水は、地球温暖化が1°C進行するごとに約7%強まると予測されている（確信度が高い）。非常に強い熱帯低気圧（カテゴリー4～5）の割合と大部分の非常に強い熱帯低気圧のピーク時の風速は、地球規模では、地球温暖化の進行に伴い増加すると予測されている（確信度が高い）。



全球で見ればー

- 熱帯低気圧発生数は変わらないか減少
- 強度は増す

北西太平洋ではー

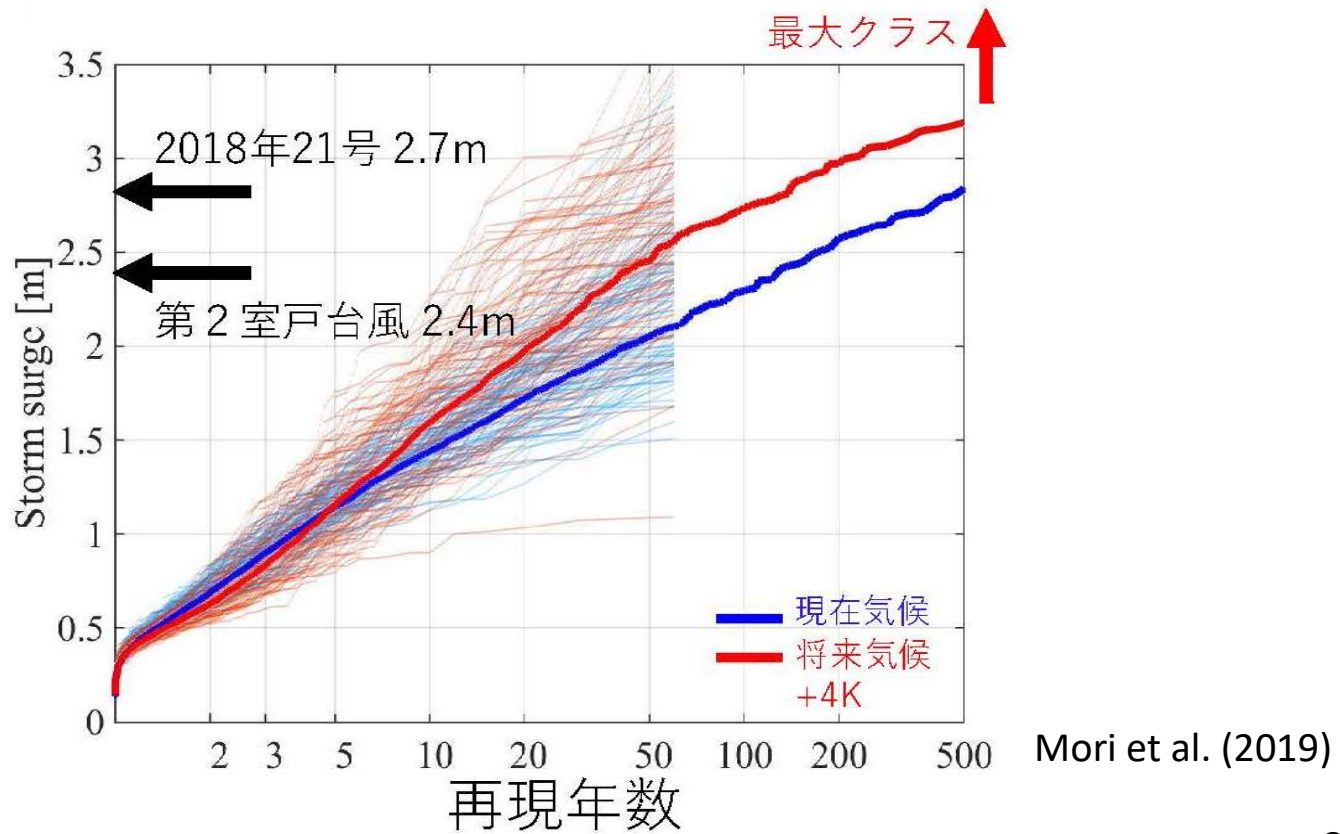
- 日本付近での暴露は増加
 - フィリピン付近では減少
- ⇒ 日本により大きな台風リスク

Ch11 Fig 11.20

台風リスクの変化



大阪湾における台風による高潮の変化



Courtesy of N Mori

東京海上研究所と東京大学の共同研究

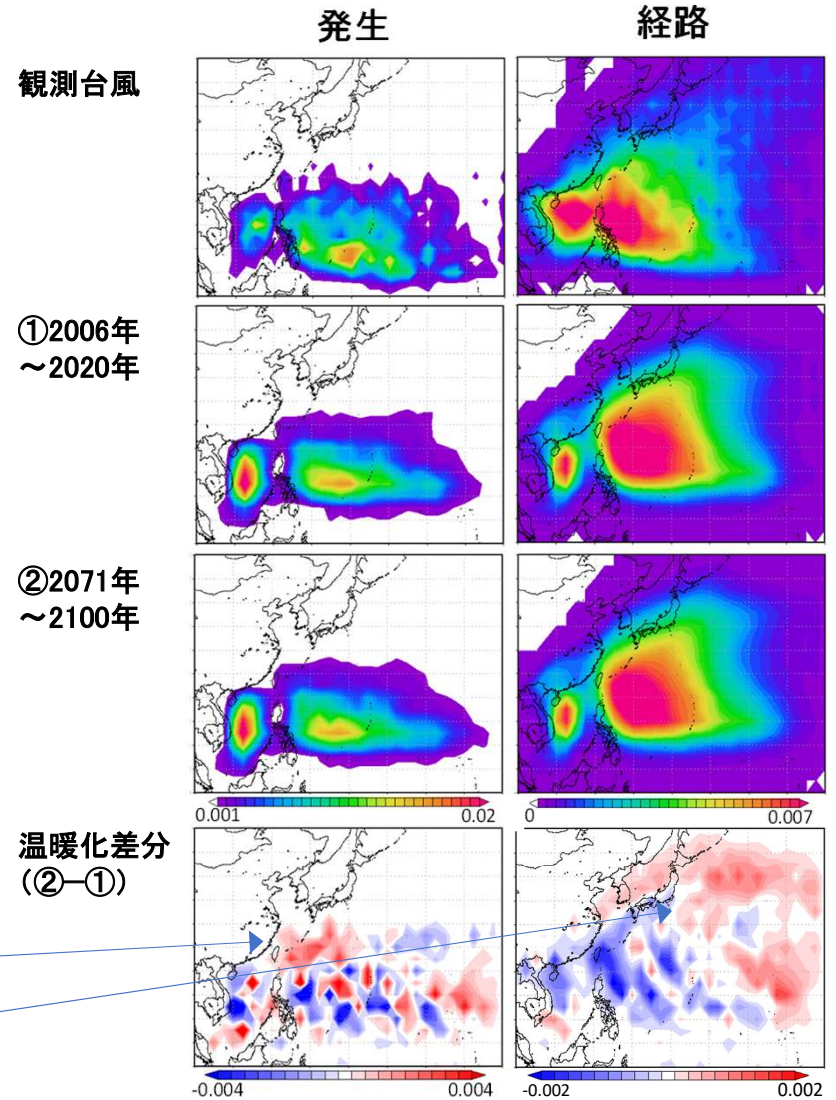
モンテカルロ法による台風モデル



環境場のインプットデータ：

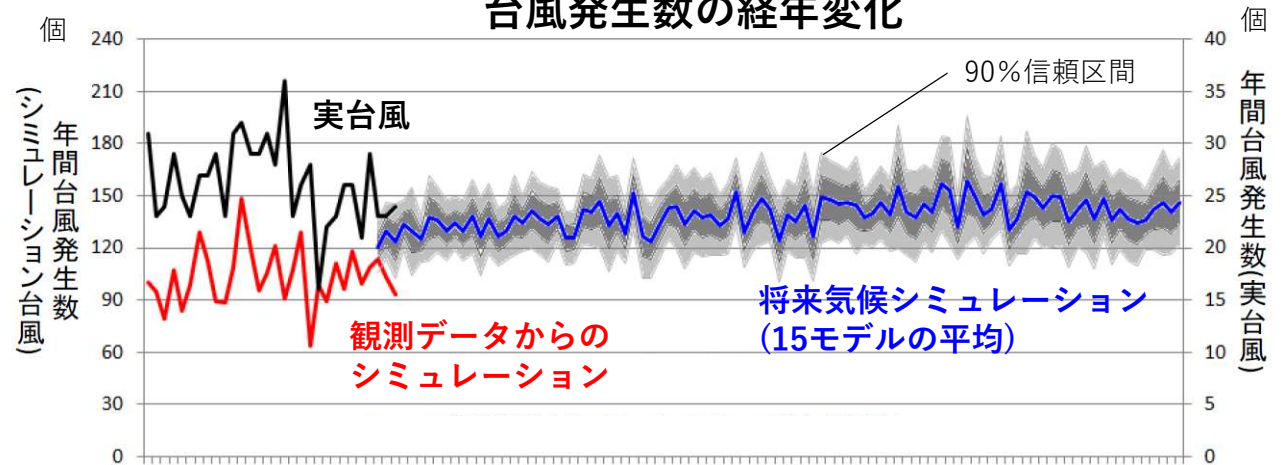
CMIP5 (15モデル) RCP4.5シナリオ 2006~2100年

- 温暖化の進展に伴い、北西太平洋の北寄り・東側で台風発生が増加
- 日本の北東の海域を通過する台風が増加
⇒ AR6と整合的

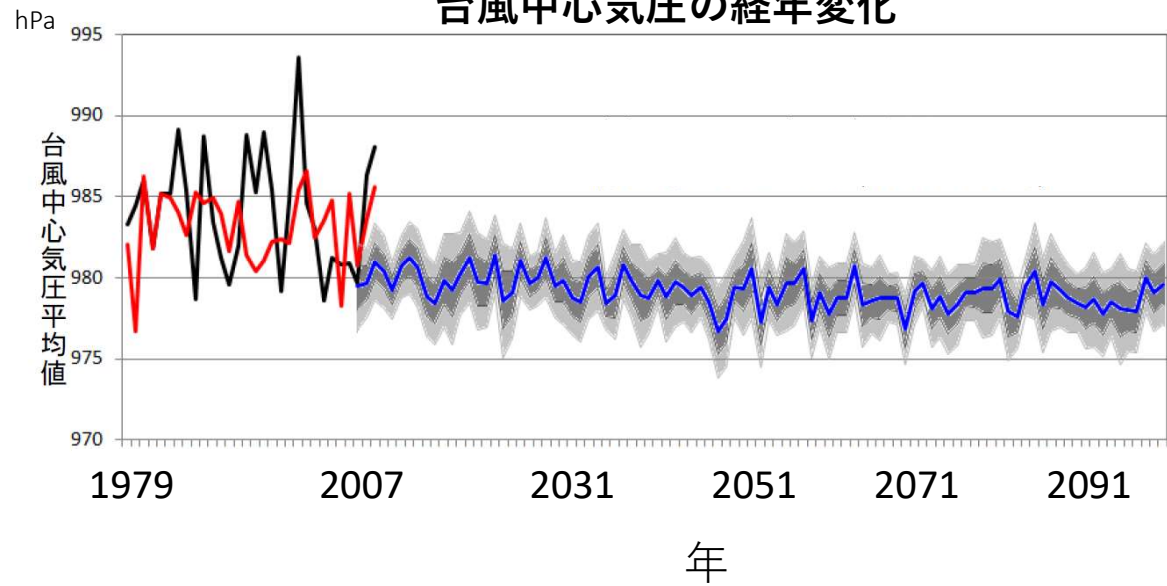


- 台風発生数は温暖化の進展に伴って増加傾向
⇒ 強い台風/弱い台風では？
- 平均中心気圧は今世紀末には現在気候下より2~3hPa程度低下
- 将来の変動幅を過小評価しているかもしれない
- 温暖化レベルで整理すると？

台風発生数の経年変化



台風中心気圧の経年変化



AR5以降なにが分かったかーSPMからー

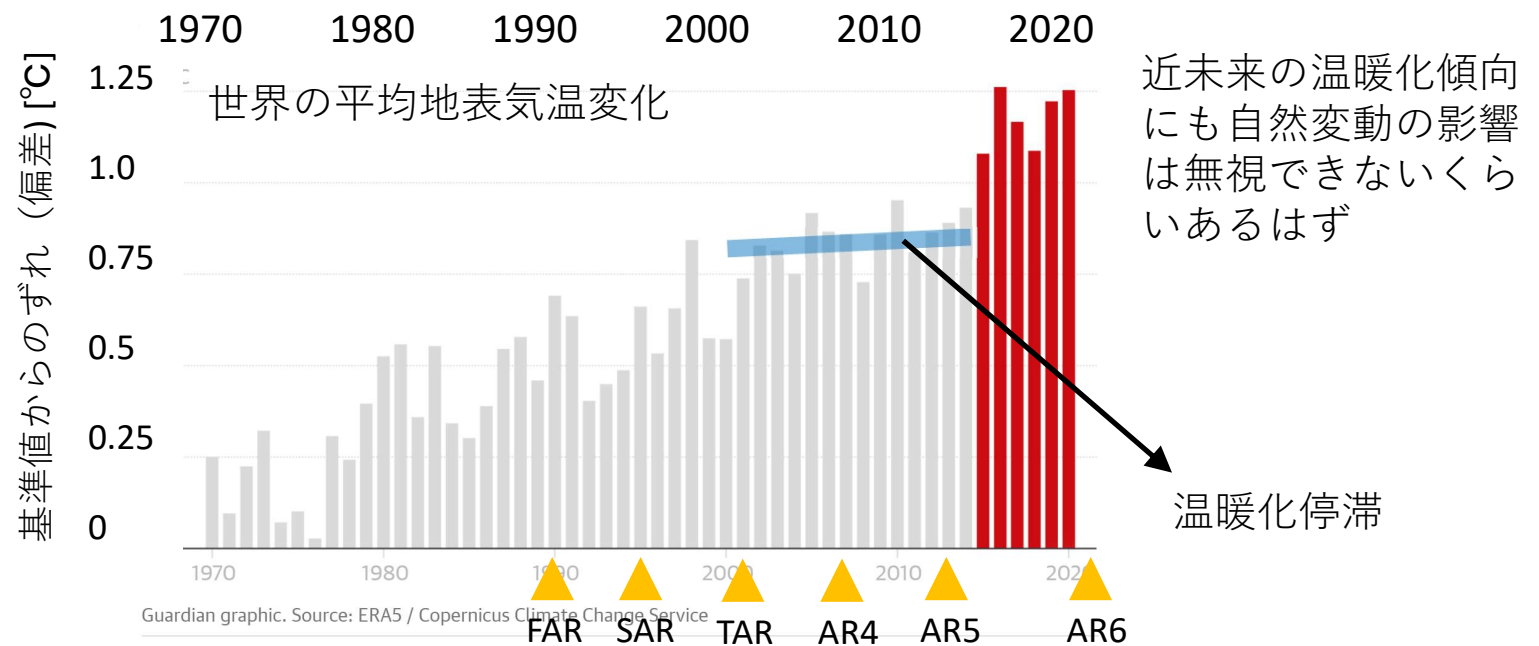


Climate Information for Risk Assessment & Regional Adaptation

Natural drivers and internal variability will modulate human-caused changes, especially at regional scales and in the near term, with little effect on centennial global warming.

自然変動は、人間活動により生じる変化（特に近未来の地域規模）を変調する。

近年の温暖化停滞（ハイエイタス）は一時的なもので、温暖化トレンドを自然変動が打ち消していたことで説明される



The Guardian, 8 Aug 2021

AR5以降なにが分かったかーSPMからー



Our Possible Climate Futures

Many changes due to past and future greenhouse gas emissions are irreversible for centuries to millennia, especially changes in the ocean, ice sheets and global sea level.

過去から将来の温室効果ガス排出による気候変化の多く、特に海洋・海氷・海水準の変化は、数百年から千年の時間スケールでは不可逆的である。

長期的な海面上昇 = 不可避な気候変化(Committed changes)

1901-2018年の海面上昇は20 [15-25] cm

2100年時点では(1995-2014比)ー

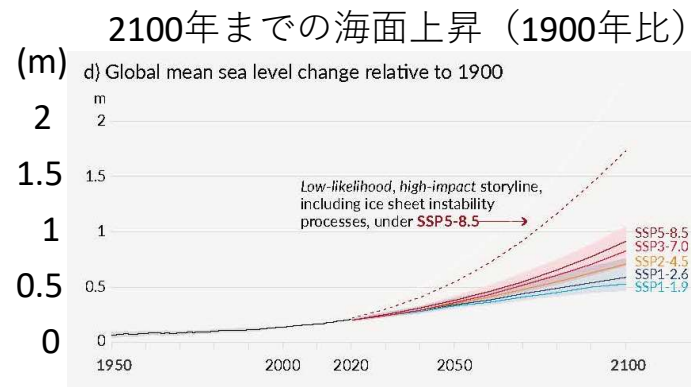
SSP1-1.9 +28-55 cm

SSP5-8.5 +63-101 cm

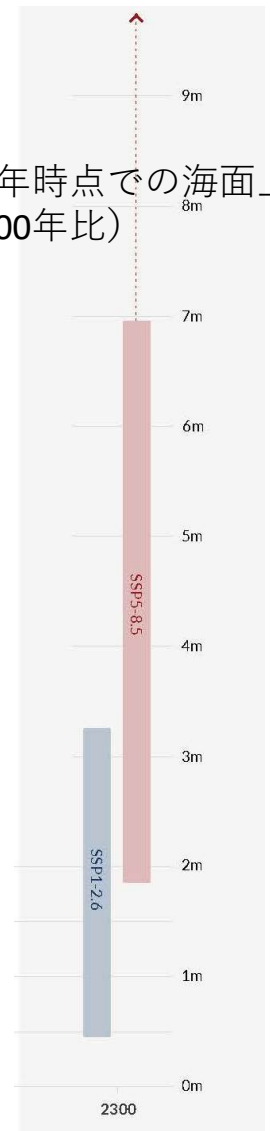
氷床プロセスの不確実性を考えるとー

SSP5-8.5 +200 cm

の可能性は却下できない



2300年時点での海面上昇 (1900年比)



SPM Fig 8

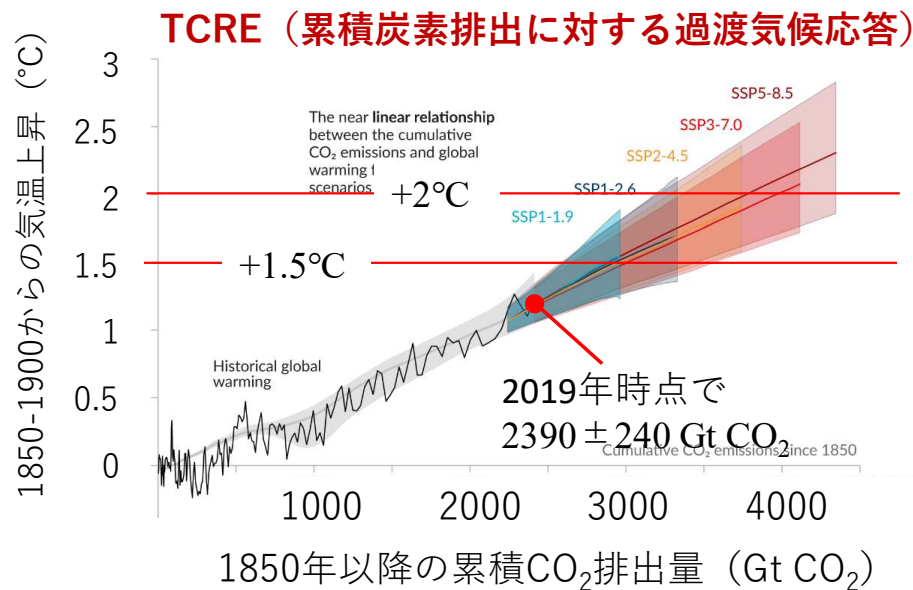
AR5以降なにが分かったかーSPMからー



Limiting Climate Change

Limiting human-induced global warming to a specific level requires limiting cumulative CO₂ emissions, reaching at least net zero CO₂ emissions, along with strong reductions in other greenhouse gas emissions.

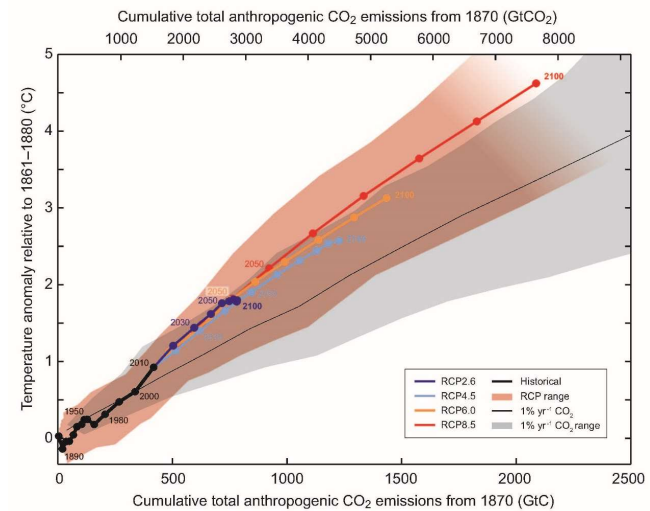
自然科学的観点からは、人間活動が引き起こす温暖化をあるレベルでとどめるには、CO₂以外の温室効果ガスの排出を強力に減らすこととともに、CO₂累積排出量を止めることーすなわち正味でCO₂の排出をゼロにすることーが求められる。



SPM Fig 10



AR5で初めて示された (定性的には同じ)



AR5 SPM Fig 10

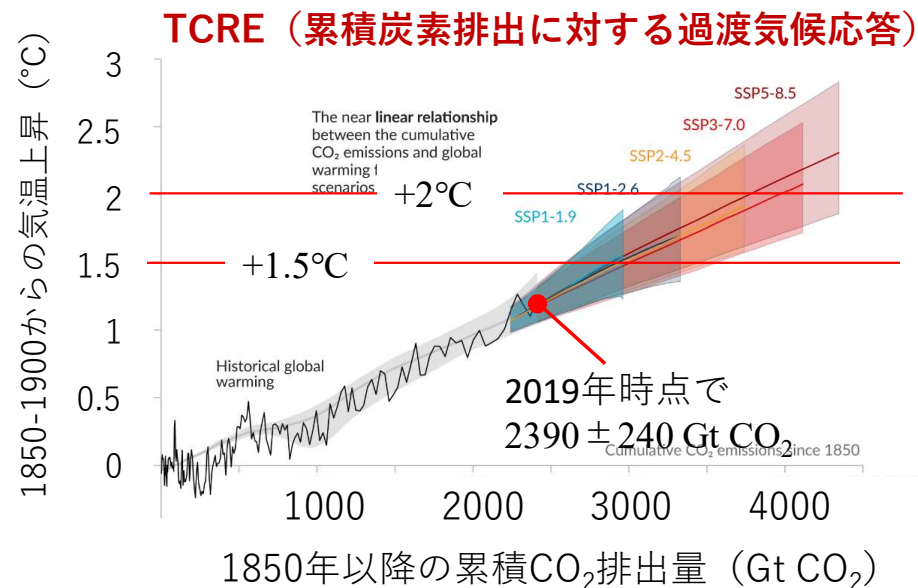
AR5以降なにが分かったかーSPMからー



Limiting Climate Change

Limiting human-induced global warming to a specific level requires limiting cumulative CO₂ emissions, reaching at least net zero CO₂ emissions, along with strong reductions in other greenhouse gas emissions.

自然科学的観点からは、人間活動が引き起こす温暖化をあるレベルでとどめるには、CO₂以外の温室効果ガスの排出を強力に減らすこととともに、CO₂ 累積排出量を止めることーすなわち正味でCO₂の排出をゼロにすることーが求められる。



AR5で示されたTCREの有効性を確認、さらに推定幅を更新

	TCRE (1000PgCあたり)
AR5	0.8~2.5°C
AR6	1.0~2.3°C

日本からの研究も重要な貢献

SPM Fig 10

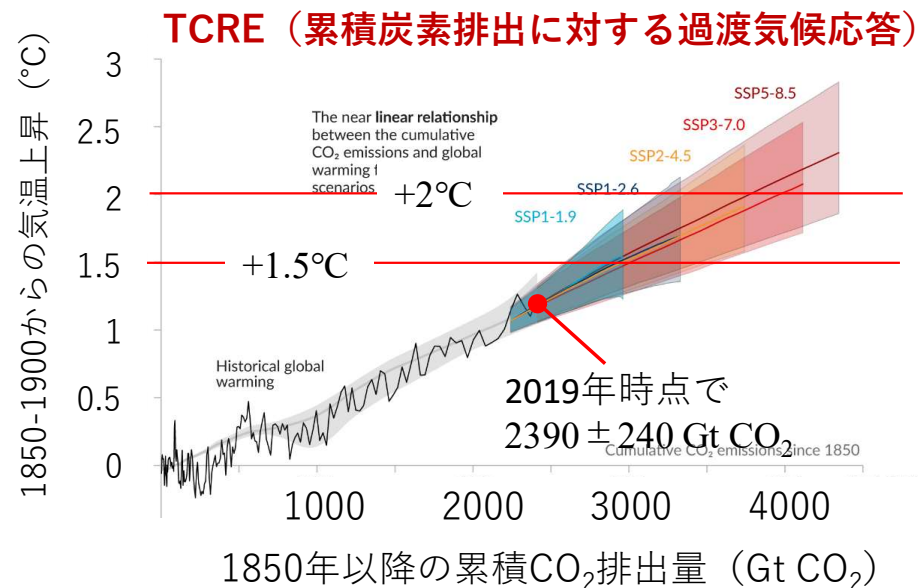
AR5以降なにが分かったかーSPMからー



Limiting Climate Change

Limiting human-induced global warming to a specific level requires limiting cumulative CO₂ emissions, reaching at least net zero CO₂ emissions, along with strong reductions in other greenhouse gas emissions.

自然科学的観点からは、人間活動が引き起こす温暖化をあるレベルでとどめるには、CO₂以外の温室効果ガスの排出を強力に減らすこととともに、CO₂ 累積排出量を止めることーすなわち正味でCO₂の排出をゼロにすることーが求められる。



温暖化レベルごとに許容される排出量 (シナリオによらない)

温暖化レベル	剰余炭素予算(Gt CO ₂)
1.5°C	500** [300-900]
2°C	1350 [900-2300]

** SR1.5では580 Gt CO₂

SPM Fig 10

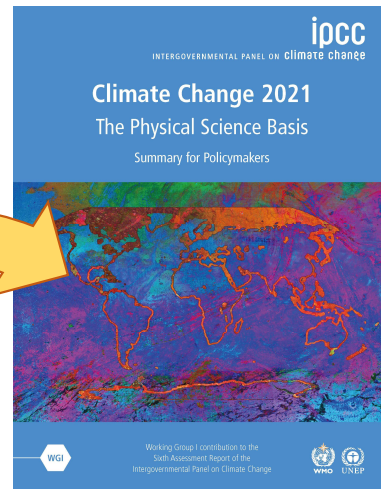
IPCC WGI AR6 —どこまでできたか—

この30年で、気候変化をより理解したか？ — YES !!

最初のIPCCレポート(1990)



最新IPCCレポート(2021)



- 今回のレポートは、温暖化のサイエンスが成熟してきたことを示す成果
- 今の気候がどうなっており、将来どうなっていくかを「温暖化レベル」で整理、異常気象に対する人間活動の影響など確信度が高まった
- カーボンニュートラルに向けて科学的根拠（なぜそれを目指す必要があるか）を強化、今後のエネルギー政策の転換を後押し

レポート(原文)はすべて以下から取得可能
<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

SPM日本語訳暫定版は以下にあります
<https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar6/index.html#SPM>

ありがとうございました

