海や森の二酸化炭素吸収と、気候変動緩和策とのつながり

（国研）海洋研究開発機構
地球環境部門　環境変動予測研究センター
河宮 未知生

自己紹介

- 統合的気候モデル高度化研究プログラム　領域テーマＢ代表
「炭素循環・気候感度・ティッピング・エレメント等の解明」

- JAMSTEC環境変動予測研究センター　センター長
（温暖化予測モデル開発などを推進）

- 第48-52,54回 IPCC 総会政府代表団メンバー
  - 助言役の専門家（文部科学省技術参与）として、「政策決定者向け要約」(SPM) 取りまとめ等に携わる。

    (IPCC 第1作業部会第6次評価報告書や1.5℃特別報告書など）

- ほか、IPCC 関連の活動
  - データタスクグループ(TG-Data)メンバー
  - IPCC国内幹事会副代表

本講演の立ち位置

IPCC AR6WGIの章立て

- 第1章: 構成、背景、手法
- **第2章: 気候システムの変化状態**
- **第3章: 人間が気候システムに及ぼす影響**
- **第4章: 将来の世界の気候**
- 第5章: 地球規模の炭素／生物地球化学的循環
- 第6章: 短寿命気候強制因子
- 第7章: 地球のエネルギー収支・フィードバック・気候感度
- 第8章: 水循環の変化
- 第9章: 海洋、雪氷圏、及び海面水位の変化
- 第10章: 世界規模と地域規模の気候変化のつながり
- 第11章: 気象及び気候の極端現象
- 第12章: 地域規模の影響とリスクの評価のための情報
- アトラス

大洋/大陸 ～ 全球スケールの変化

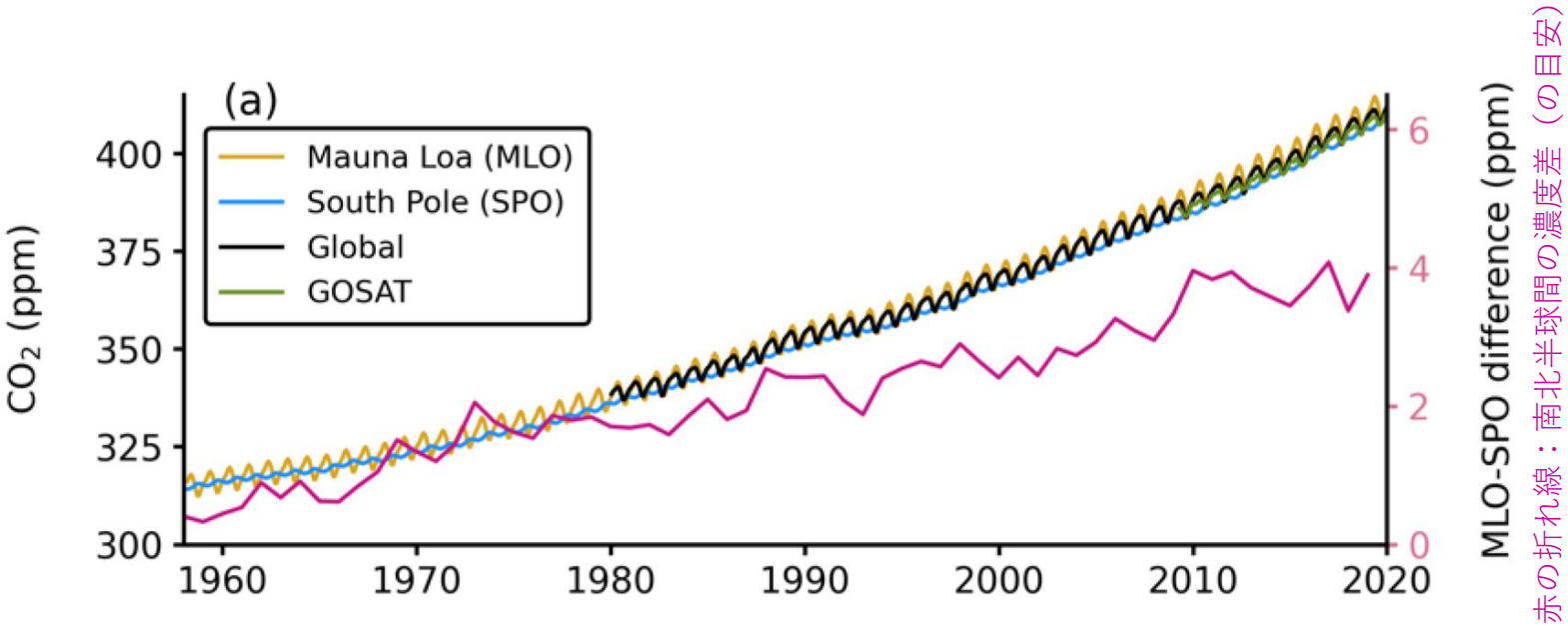
プロセス理解

地域スケールの変化

「政策決定者向け要約」(SPM) の概要

A. 気候の現状
B. 将来ありうる気候
C. リスク評価と地域適応のための気候情報
D. 将来の気候変動の抑制

大気中CO_2濃度の増加：温暖化の主要因

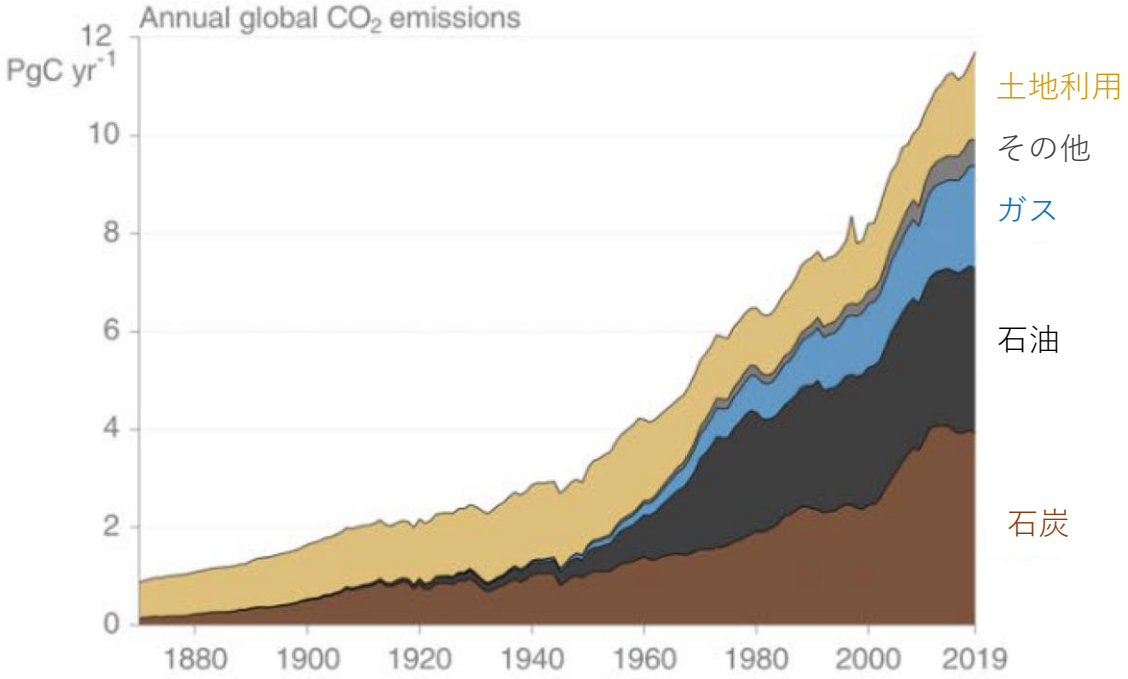


AR6, Fig.5.6

- 100ppm = 0.01%
- 講演者が高校生のころの教科書には、「大気中のCO_2濃度は0.03%」と書いてあった。2010年代には0.04%を越えている。
- グラフの細かなギザギザについては後述。

人間活動によるCO_2排出量の増大

世界の年あたりCO_2排出量



AR6, Ch.5, Fig.5.5

- この40年でほぼ倍増している。
- 土地利用変化（主に森林伐採）による排出が15%ほどあることに注意。
- 「排出量」と「濃度」の違いに注意。お金に例えれば、排出量は毎月の収入に、濃度は貯金にあたる。

人為起源 CO_2 の行方 (2010–2019): CO_2 の家計簿

放出量 = 吸収・蓄積量

34.4 $GtCO_2$/yr

86%

14%

5.7 $GtCO_2$/yr

18.6 $GtCO_2$/yr

46%

31%

12.5 $GtCO_2$/yr

23%

9.2 $GtCO_2$/yr

- 年々の排出量のうち、約半分強が陸域（主に森林）または海洋に吸収される。
- 大気中に残ったもう約半分弱が、濃度上昇をもたらしている。

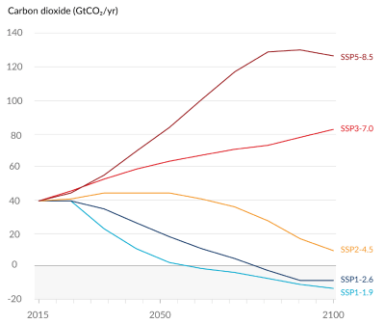
収支の不均衡:
(放出量と吸収・蓄積量との差)

0.4%
0.2 $GtCO_2$/yr

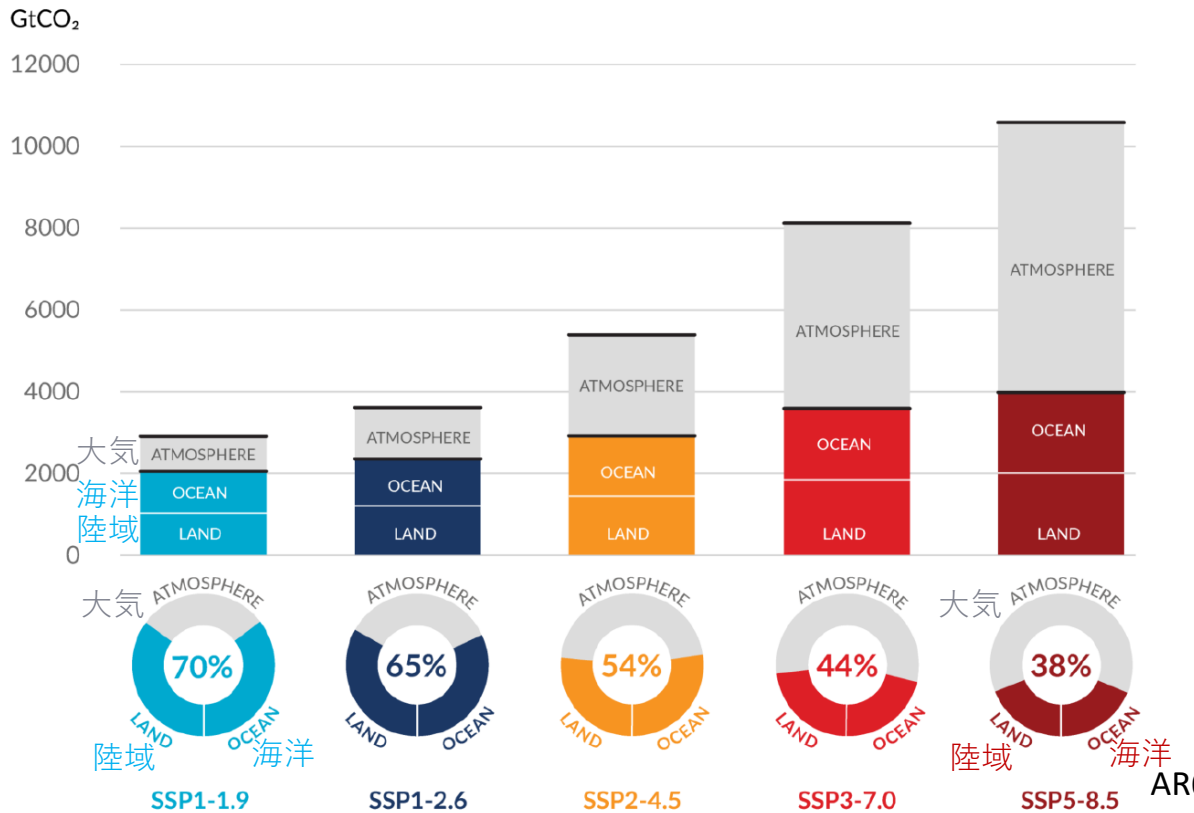
Source: Friedlingstein et al 2020; Global Carbon Budget 2020

海陸に吸収されるCO_2の割合の予測

将来の排出量シナリオ



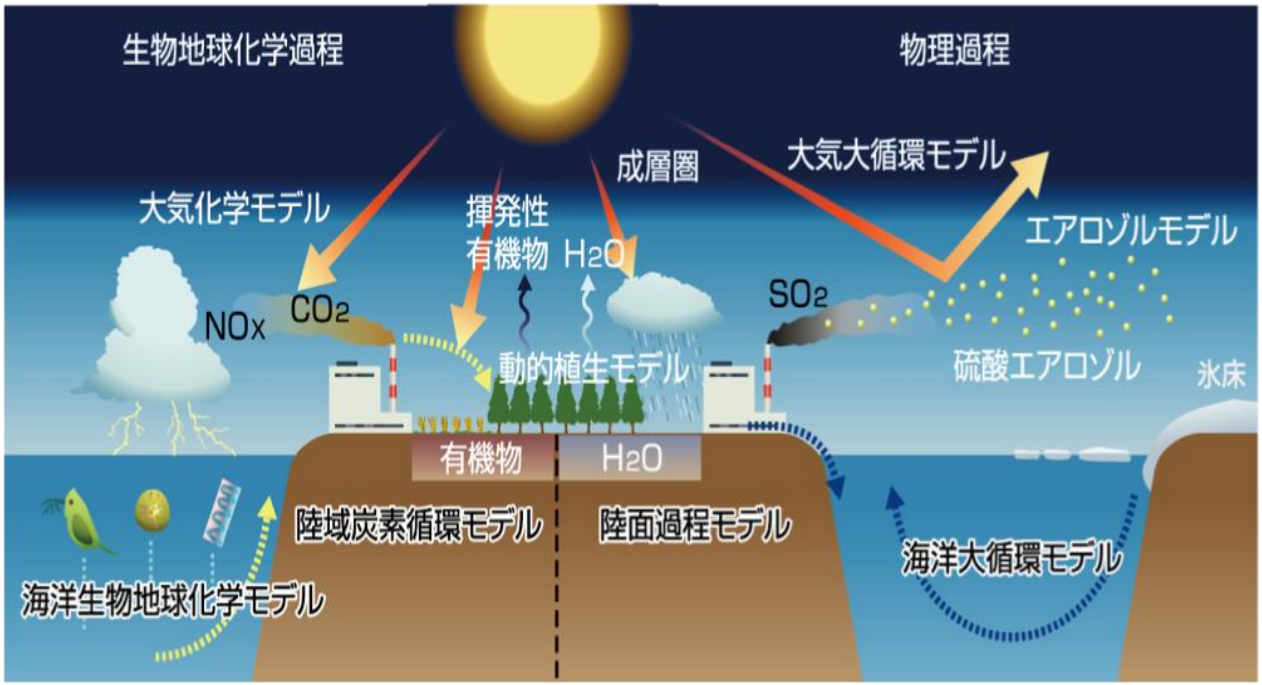
AR6, Fig.SPM4



AR6, Fig.SPM7

- 海陸に吸収される割合(1/2+)は、排出量の多いシナリオ（将来想定）ではどんどん減っていく。
- 炭素循環が関わる予測には、海陸生態系の役割を考慮した「地球システムモデル」(ESM)が用いられる。

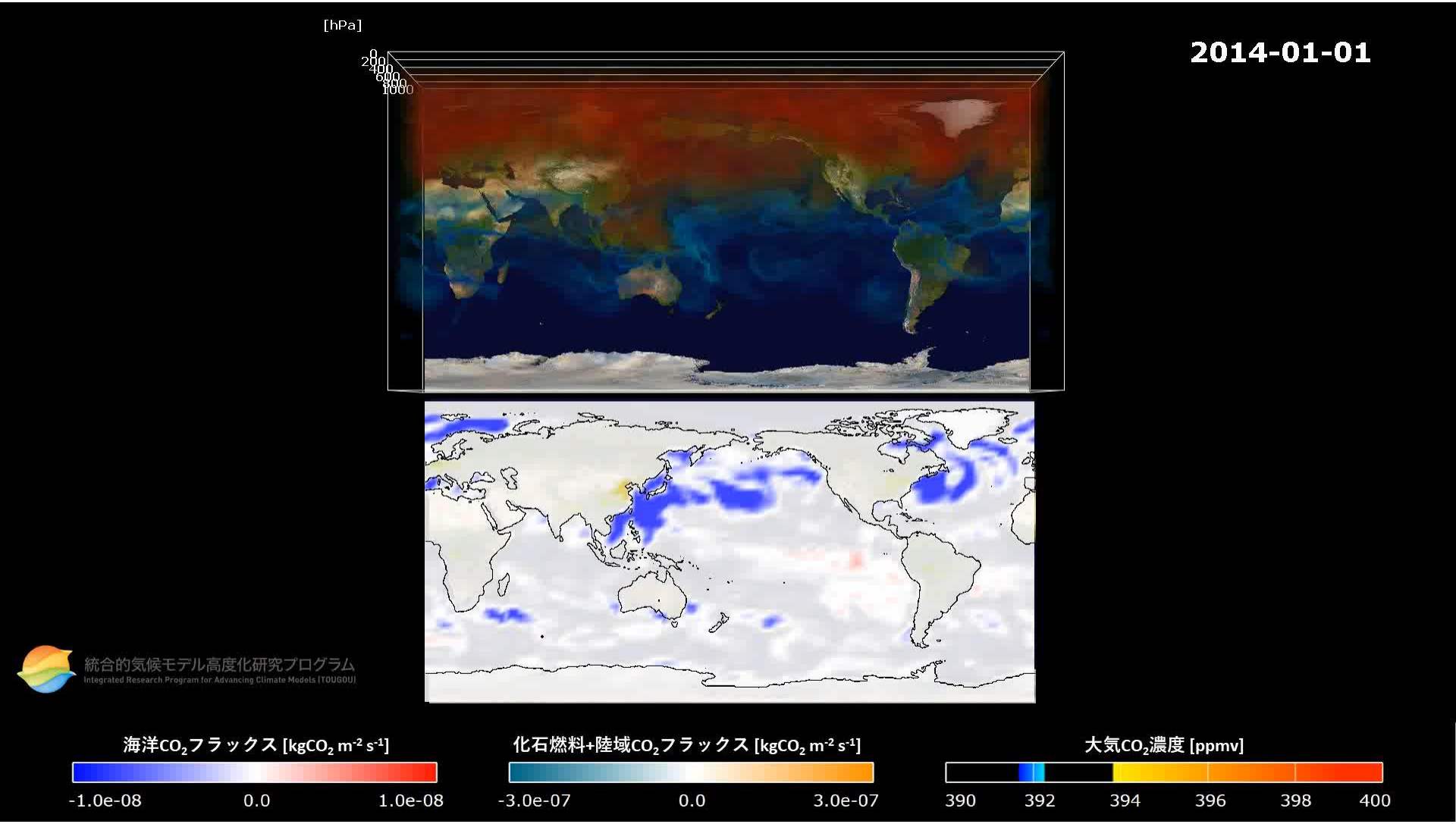
地球システムモデル(ESM)



- 地球システムモデル(ESM)：生き物が入った気候シミュレーションモデル
  - CO2を吸収する森林や海洋の役割や、気候変動の影響を考慮している。
  - 海陸生態系と気候変動の相互作用を扱えることが特長。

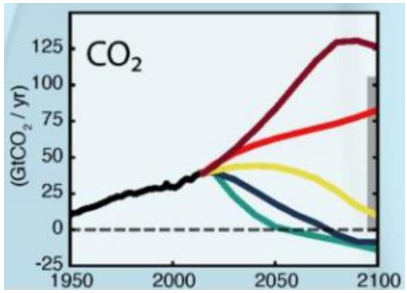
- 2000年代前後から、各国主要研究機関で開発が進む。国内では気象庁気象研究所やJAMSTECが開発に取り組む。

統合Pで開発したESMの出力例

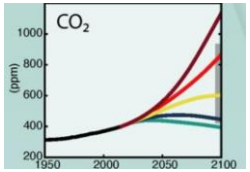


5つの「例示的」シナリオによる昇温予測

CO_2排出量の過去データと将来想定

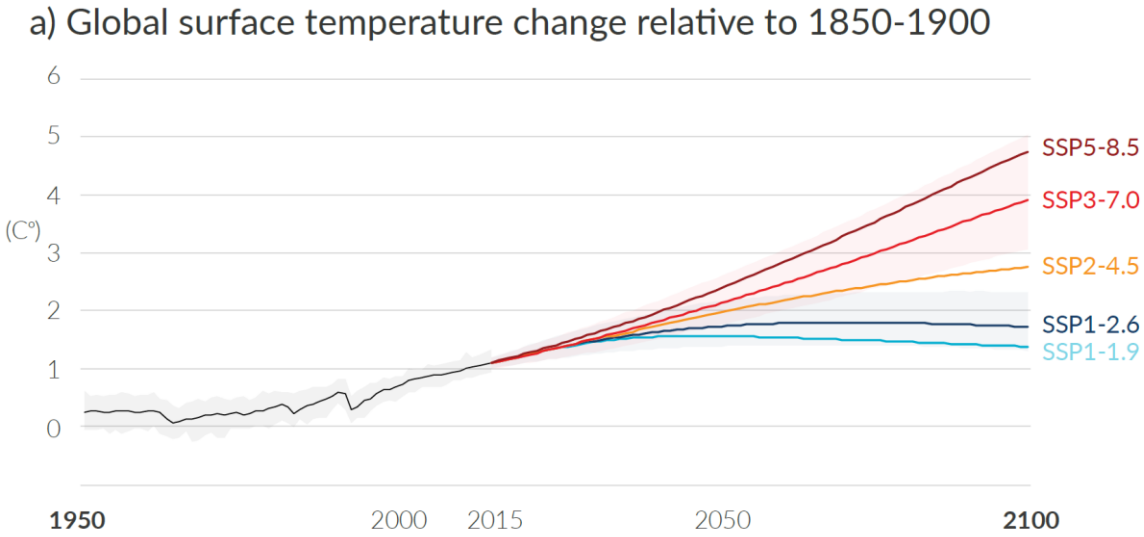


CO_2濃度の過去
データと将来想定



AR6, Fig.TS4

1850-1900年を基準とした地表面気温の変化（地球全体の平均）

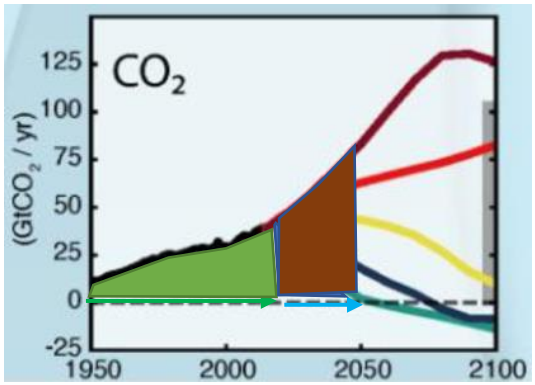


AR6, Fig.SPM8

- 排出量データは、温暖化予測国際プロジェクトCMIP6の入力データとして利用（簡便法で濃度に変換してから入力することも）。
  - 世界から28のモデリングセンターが参加。統合PのMIROCチームは、例えば提出データ量では5番目に位置するなど、メジャーな存在。
  - 日本からの予測データは、日本のITプロジェクト「DIAS」より世界に配信。

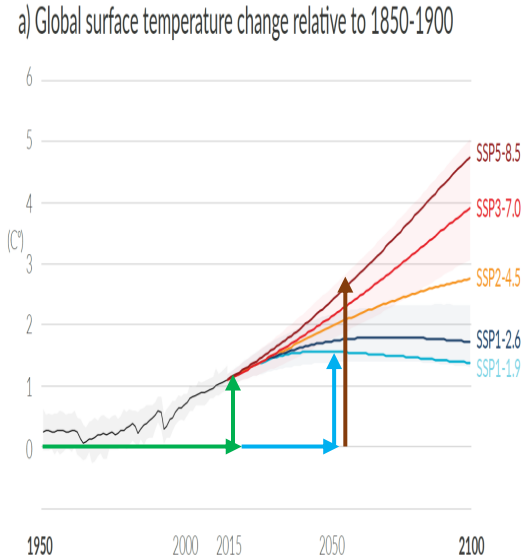
予測結果の横軸を「炭素排出量」に変換

CO_2排出量の過去データと将来想定

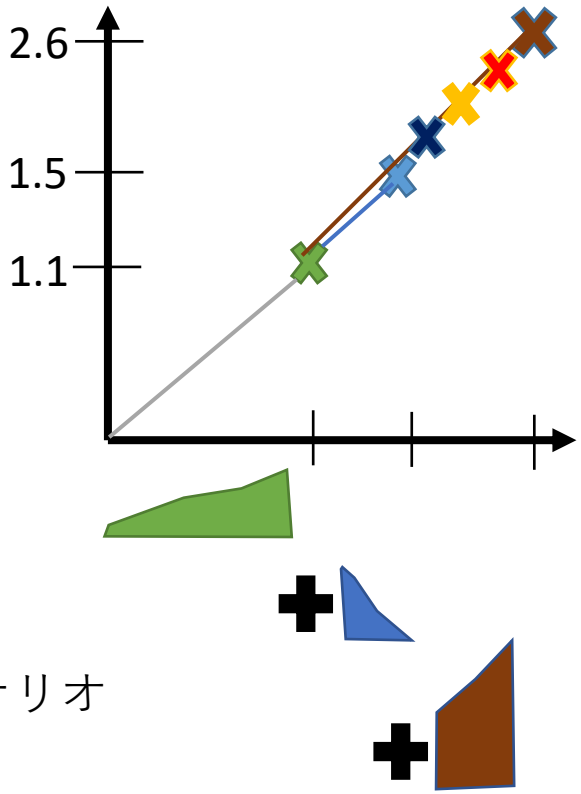


AR6, Fig.TS4

1850-1900年を基準とした地表面気温の変化（地球全体の平均）

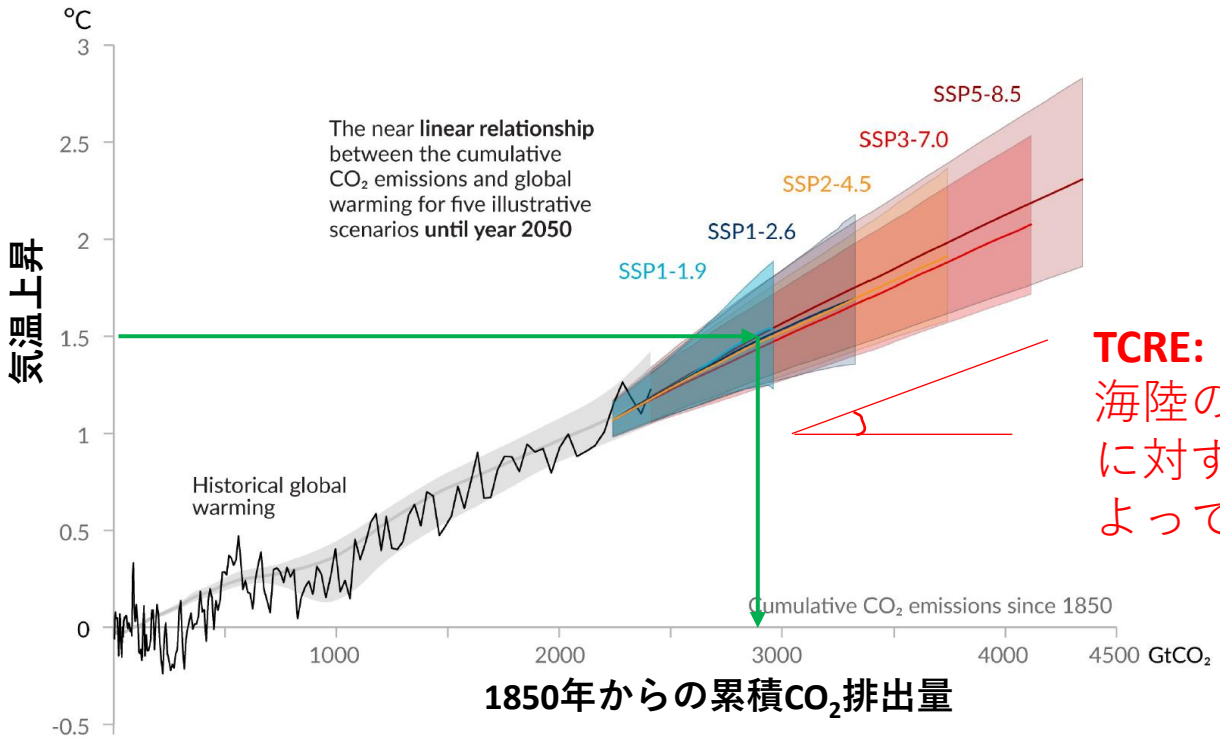


AR6, Fig.SPM8



- 横軸を（累積の）炭素排出量に変換すると、どのシナリオの予測結果も一直線上に乗る！

累積炭素排出量と昇温は正比例：排出分だけ、気温もあがる



TCRE: このグラフの傾き：海陸の炭素吸収、CO2増に対する気候の応答によって決まる。

AR6, Fig.SPM10

TCRE(排出に対する過渡気候応答)：1.5℃, 2℃といった目標達成のために、排出をどの程度までに抑える必要があるかの検討に大切な数値。

-> 統合PテーマBの成果(Tachiiri et al., 2015, 2019)などをもとに決定。

カーボンバジェット：目標達成のために、排出をどの程度までに抑えないといけないか

1850-1900年と2010-2019年の間の温暖化（℃）	これまで(1850-2019年)の累積CO2排出量 ($GtCO_2$)
1.07 (確からしい範囲: 0.8-1.3)	2390 (確からしい範囲: ±240)

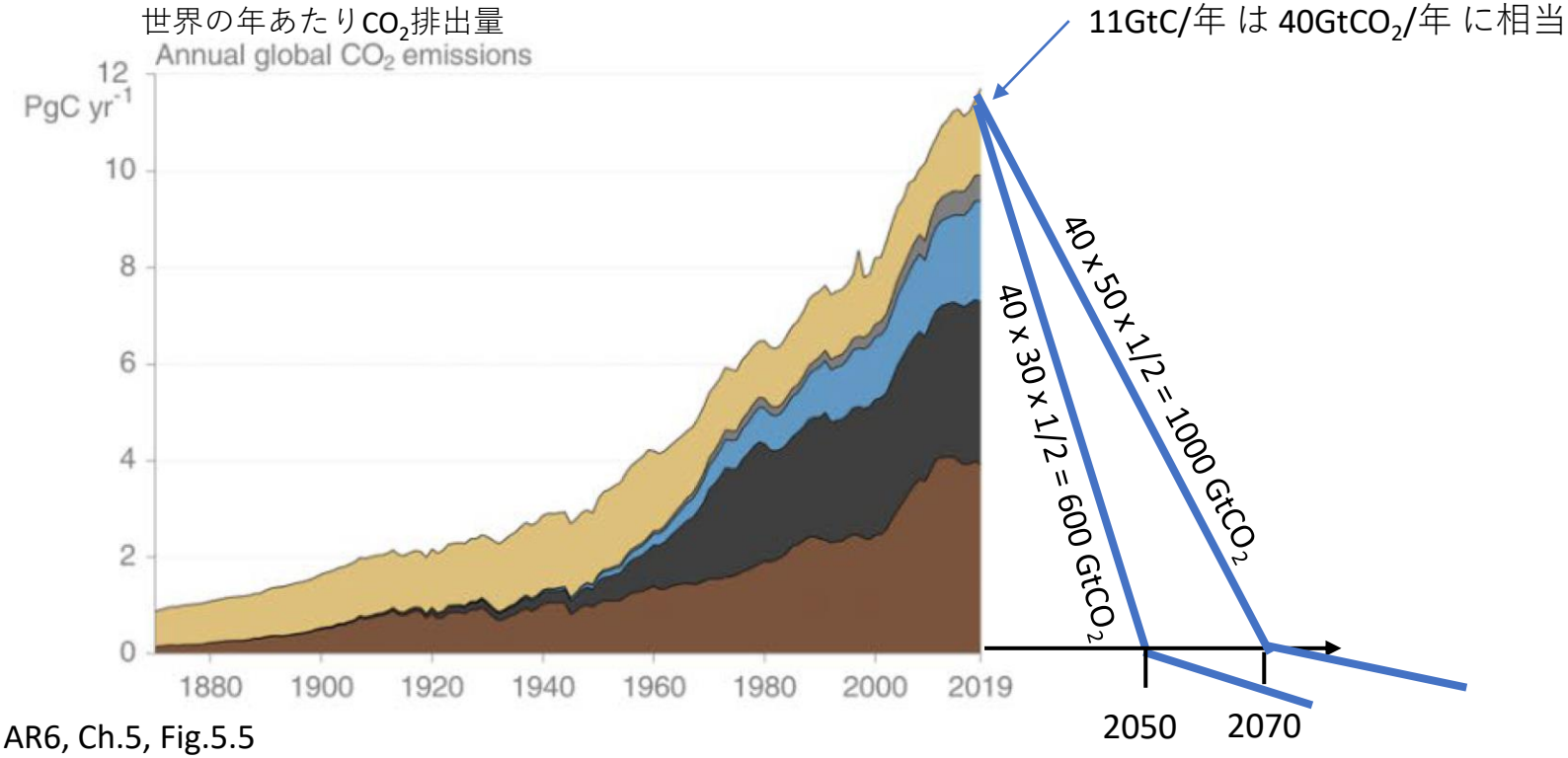
1850-1900年基準での、抑制目標までのおおよその昇温（℃）	2010-2019年基準での、抑制目標までのおおよその昇温（℃）	2020初めを起点とした残余カーボンバジェットの評価 ($GtCO_2$) 抑制目標までに温暖化を抑えられる確率 17%	33%	50%	67%	83%	非CO2温室効果気体の排出削減の変動
1.5	0.43	900	650	500	400	300	非CO2温室効果気体の排出削減の増減に伴い、左の数字は220 GtCO2増減する可能性がある。
1.7	0.63	1450	1050	850	700	550	
2.0	0.93	2300	1700	1350	1150	900	

＊第5次報告書からは上方修正、1.5℃特別報告書とは同程度。

AR6, Table SPM.2を講演者が和訳

- TCREの評価をもとに、緩和目標と合致する今後のCO2排出の上限値を算出。
  - 例えば、1.5℃目標について言えば：
    - 「大丈夫そう」を目指すなら400$GtCO_2$以下
    - 「一か八か」でよいなら500$GtCO_2$以上
  - ちなみに、現在の排出量は約 40$GtCO_2$/年
- これまでの排出量2390$GtCO_2$と比較すると、大変さが分かる。

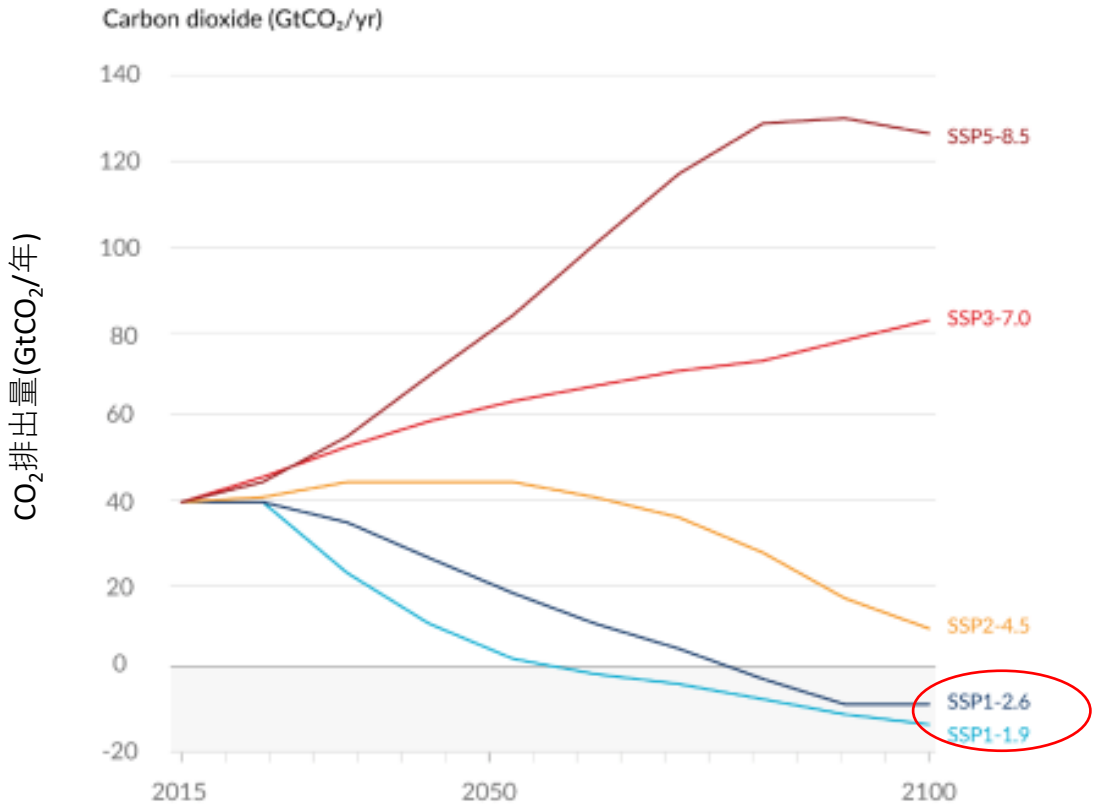
カーボンバジェットの観点から見た「2050年カーボンニュートラル」



AR6, Ch.5, Fig.5.5

- カーボンバジェットの考え方から、温暖化ストップのためには、「正味排出ゼロ」が要請されることがわかる。
- 2050年までに、直線的に排出ゼロまで削減していった場合：
  - 累積排出量は600GtCO$_2$->1.5℃目標の「一か八か」の値を越えている。
  - 1.5℃目標達成には、2050年以降、「負の排出」が必要。

CMIP6で採用された将来シナリオ



AR6, Fig.SPM4

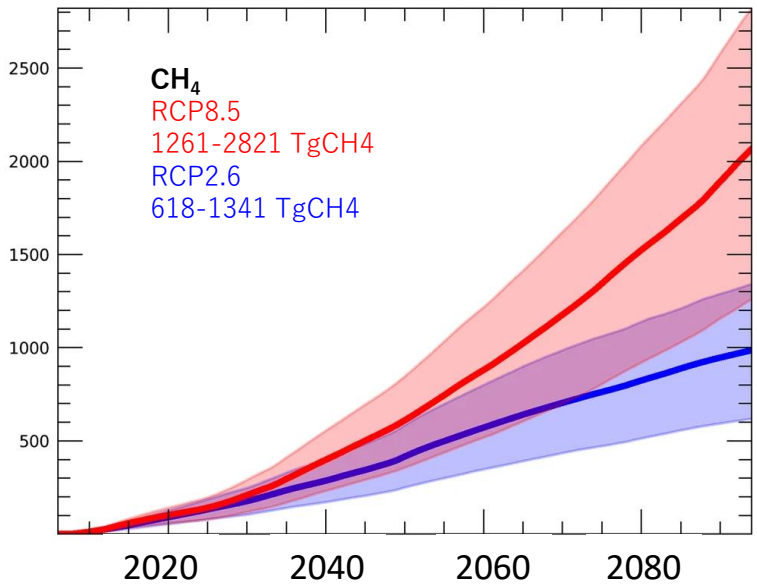
- 温暖化予測国際プロジェクトCMIP6 では、1.5℃, 2℃目標に対応するシナリオとして、それぞれ SSP1-1.9, SSP2-2.6 を用意。

カーボンバジェットの不確実性をもたらす要因

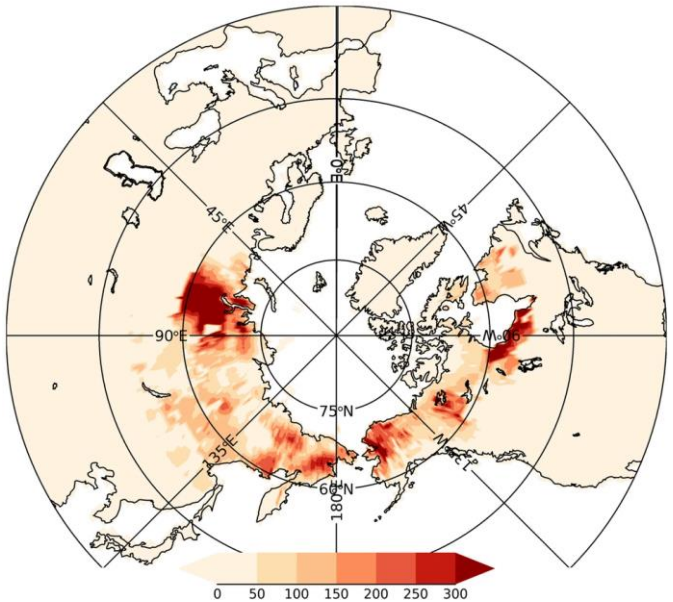
- **TCREの評価**
  - AR6では0.45 (0.27-0.63) ℃という評価に
- **現在時点までの温暖化の評価**
  - AR6では、1.07℃という評価に
- **CO_2以外の温室効果気体による気温変化**
  - CO_2と並行して、メタンやN_2Oの排出削減も進める必要
- **地球システムのフィードバック**
  - 永久凍土からのメタンやCO_2の放出、など
- **ゼロ排出コミットメント**
  - 「CO_2排出をゼロにしたら昇温はどうなるか」という仮想的な量。
  - AR6では、「ほぼゼロ」(-0.34-0.28)℃という評価に。

「地球システムのフィードバック」に対する統合Pの貢献

メタン放出量の時系列予測



メタン放出積算量の地理分布



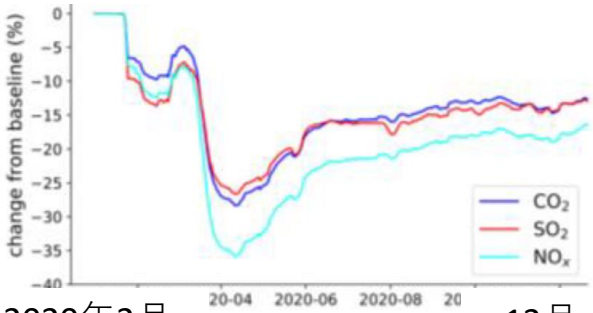
Yokohata et al. (2020, AR6で引用)：

- 永久凍土融解によるメタン(とCO_2)放出を計算するシミュレーションモデル構築
- RCP8.5シナリオで0.05-0.11℃, RCP2.6で0.03-0.07℃、温暖化に促進に働く。
  - 1.5℃, 2℃といった緩和目標に対するカーボンバジェットを、1割程度減らしうる。

カーボンバジェットの観点から見たコロナ禍

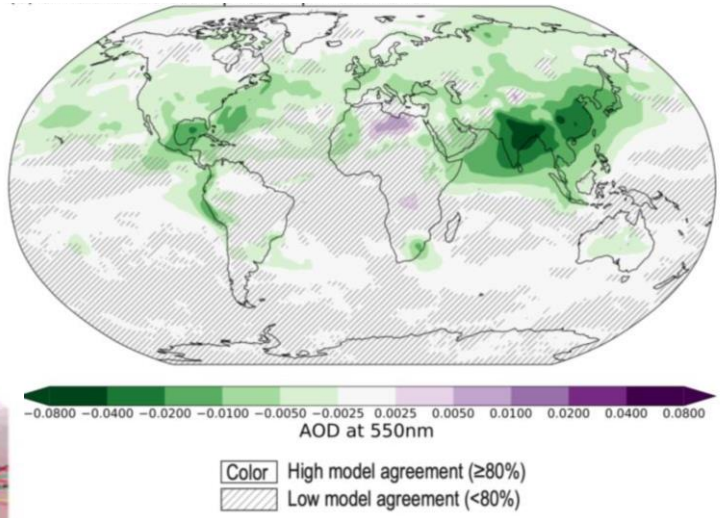
AR6, Cross-Chapter Box 6.1, Figure 1

CO2や微粒子(PM2.5等)などの排出量が減少

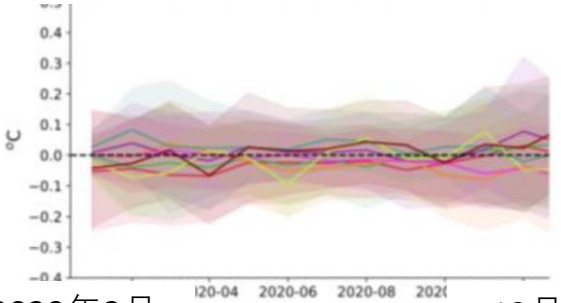


2020年2月　　12月

微粒子が日射を遮る効果が減少



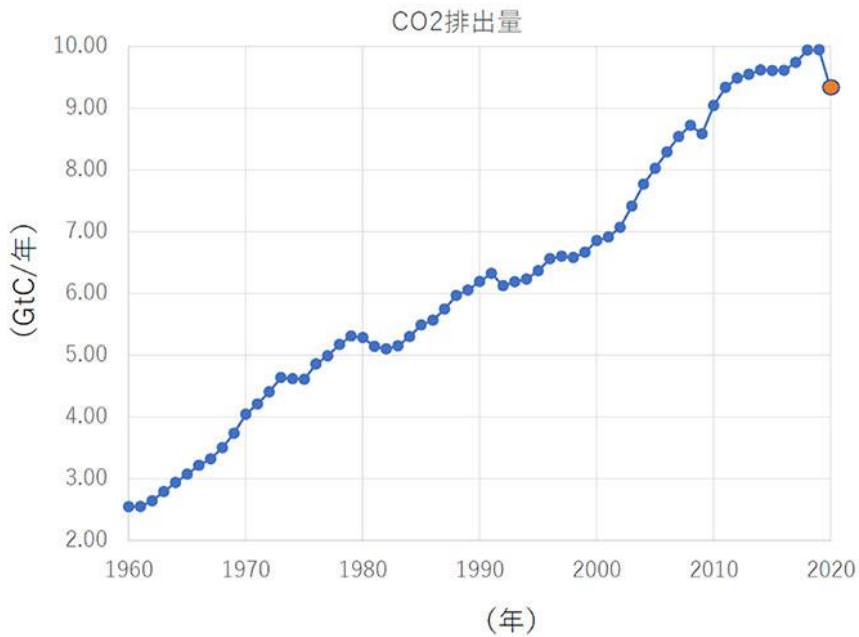
気温への影響は検出不可能



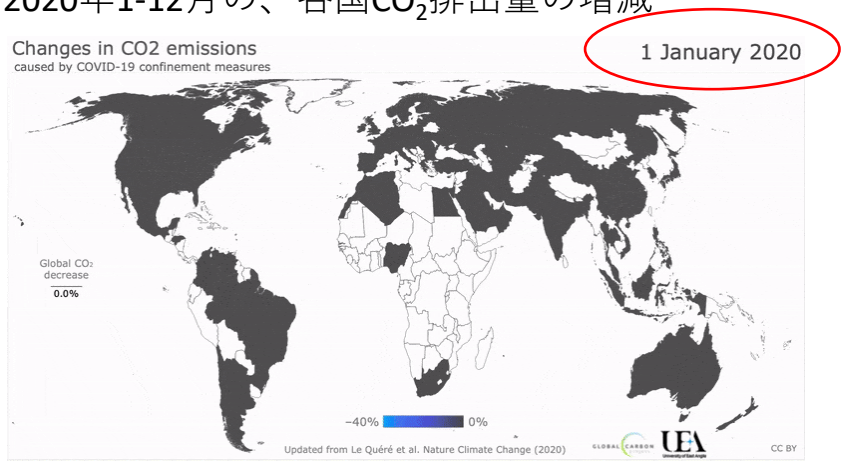
2020年2月　　12月

- コロナ禍により、CO_2やその他の温室効果気体、大気中微粒子の排出は、一時的に最大2割減少。
- 正味の効果としては、微粒子が減って太陽光がよく通ることになる温め効果の方が大きい。ただし、気温への明瞭な影響は検出不能。
- 世界から11研究グループが協力し複数モデルにより検証。統合Pも貢献。

カーボンバジェットの観点から見たコロナ禍（続き）



2020年1-12月の、各国CO_2排出量の増減



https://www.icos-cp.eu/gcp-covid19

- 2020年のCO2排出は、減少したとは言え年率換算で7%程度。残りの93%程度は、排出されている。
- カーボンバジェットの考え方から、排出した分だけ、温暖化は確実に進行することが分かる。
- 緩和目標達成を目指すならば、継続的排出削減に結びつけることが重要。

まとめ

- 累積炭素排出量と昇温の間に比例関係
  - 森林や海洋のCO_2吸収が、比例定数(TCRE)の傾きを決める重要な要素の一つ

- カーボンバジェット：緩和目標ごとの炭素排出量の上限
  - TCREの値から計算が可能
  - 1.5℃目標に対するカーボンバジェットは、現状の10数年分程度

- 正味ゼロ排出は、温暖化ストップの必要条件
  - 1.5℃目標達成には、2050年排出ゼロ達成以降も「負の排出」が必要