

気候を変える二酸化炭素

金沢大学附属図書館シンポジウム

「地球と人類のCO₂物語」

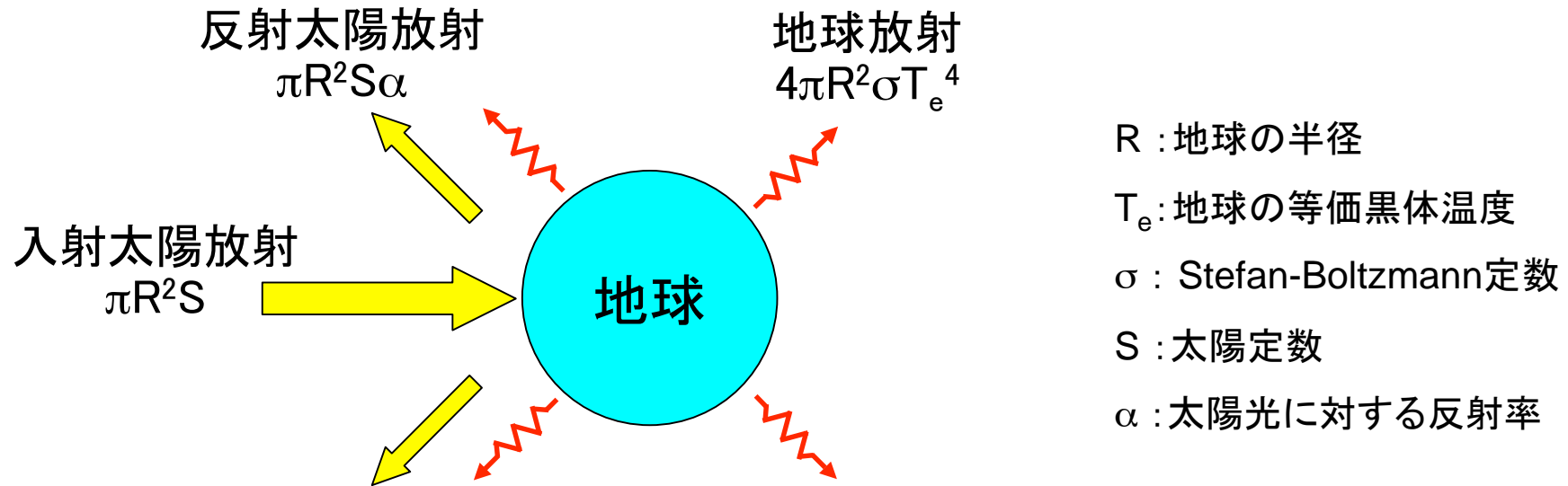
－ 二酸化炭素とのつきあい方を考えてみよう－

東北大学

中澤高清

地球の放射バランス

地球の基本的な温度は、太陽放射と地球放射のバランスで決まる



$$\text{エネルギーバランス: } \pi R^2 S = \pi R^2 S \alpha + 4\pi R^2 \sigma T_e^4$$

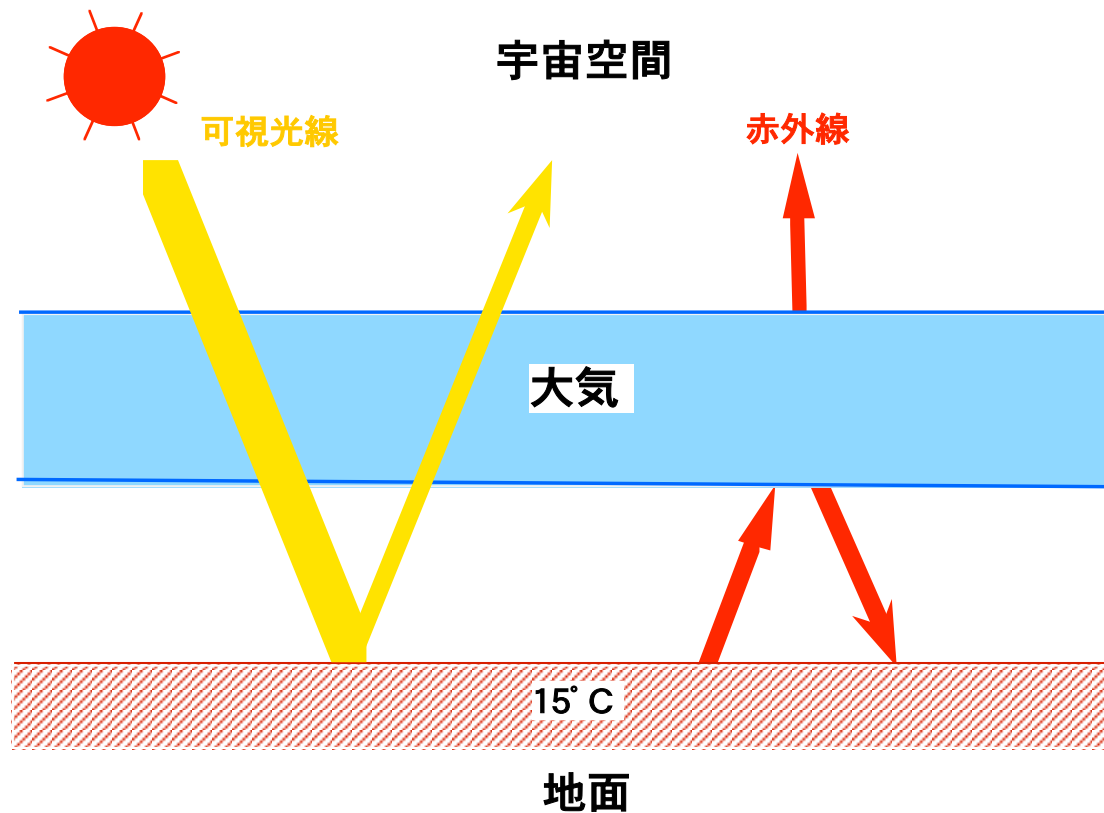


$$T_e = 255 \text{ K} (-18^\circ\text{C})$$



実際の地表付近の全球平均気温は288 K(+15°C)

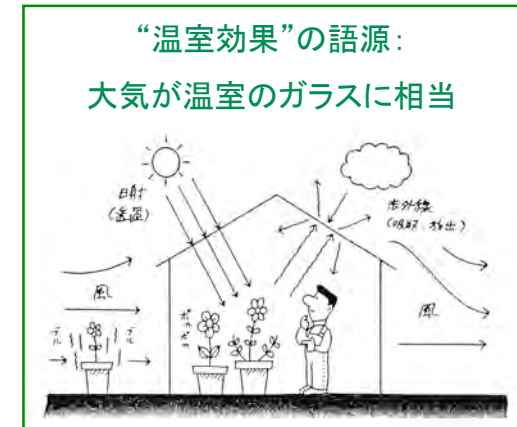
大気の温室効果



可視光線を透過させ、赤外線を吸収する気体：
H₂O、CO₂、CH₄、N₂Oなど ← 温室効果気体

温室効果の概念：ジョゼフ・フーリエ (1824)

太陽光に比べて、地球から放たれる目に見えない光(赤外線)は大気を透過しにくい → 大気は太陽にさらされたガラス容器のガラスと同じ役割を持つ(ガラスの効果と命名)



大気が無いとすると地表付近の気温は -18°C

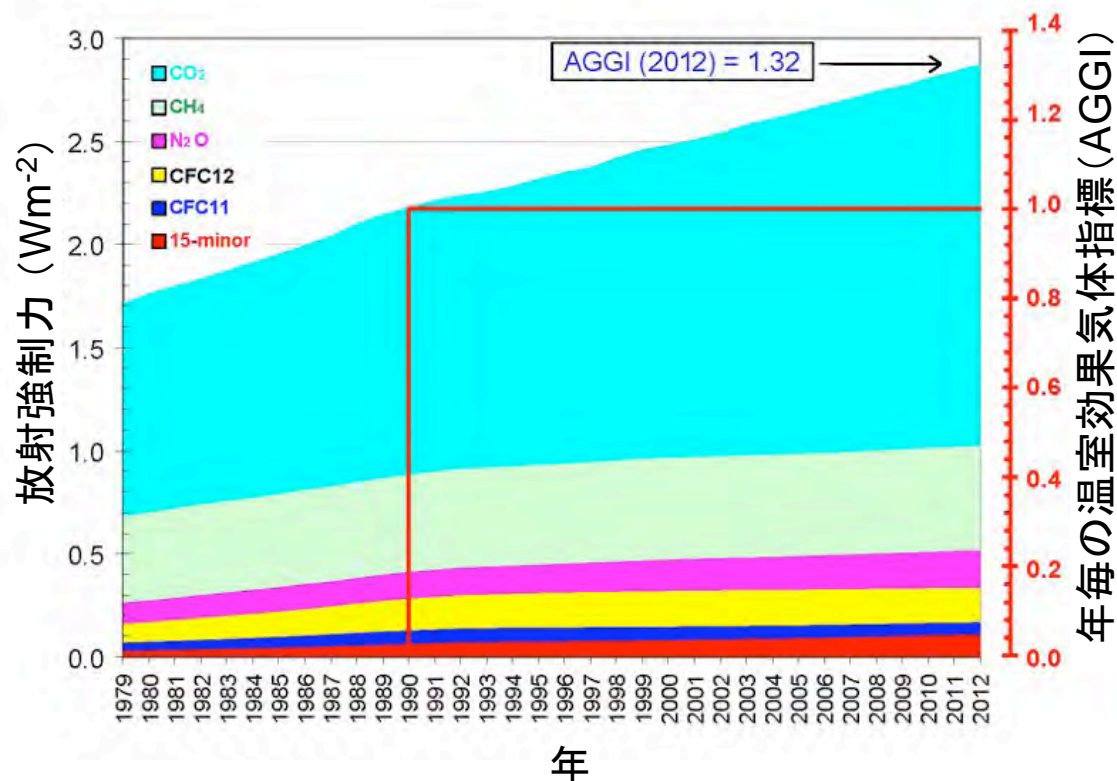


温室効果気体は微量にしか存在しないが、現在の温暖な気候を作り出すために不可欠



温室効果気体が増えると
地表気温が上昇
(地球温暖化)

地球温暖化におけるCO₂の重要性



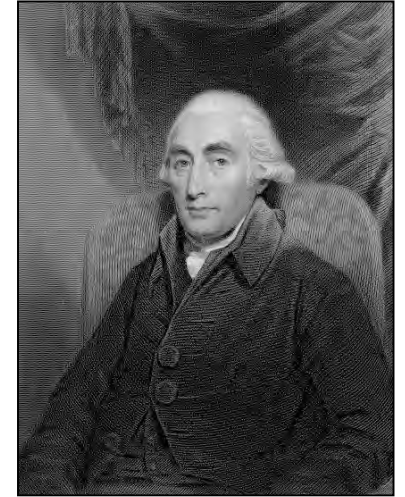
- 放射強制力が最も大きい
- 放射強制力が時間的に増加している



温暖化への寄与が最も大きい(2012年時点で全体の64%)

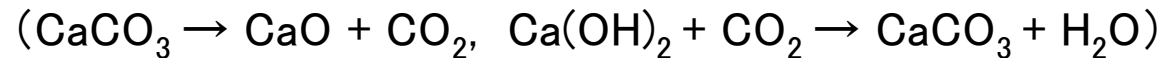
放射強制力: 何らかの要因(例えばCO₂濃度の増加)で気候が変化した時、その要因が引き起こす放射エネルギー収支の変化量として定義(気候影響を表現する尺度)。

CO₂の発見



ジョゼフ・ブラック (1754):

石灰岩を焼いた際に発生する気体を石灰水に通すと沈殿物を生ずる。空気を通して同様な沈殿物を生ずる。



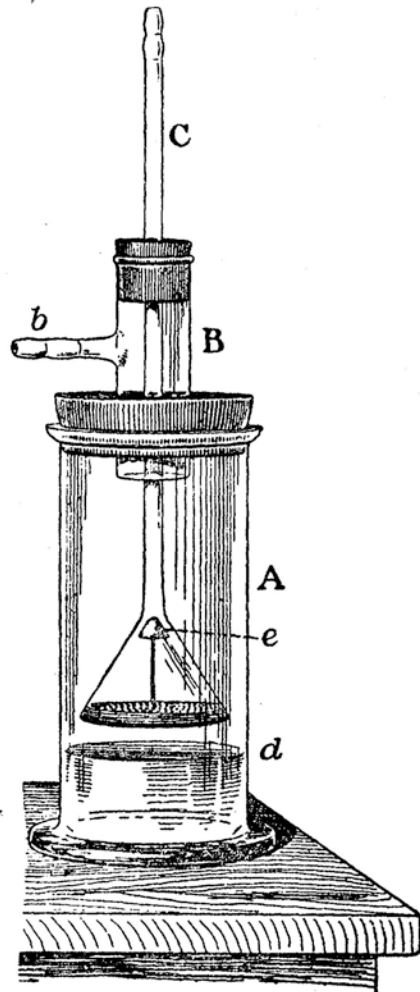
「Fixed air(固まる空気)」と命名

(1777年にアントワーヌ・ラヴォアジエが炭素と酸素の化合物であることを確認)

O₂: ヴィルヘルム・シェーレ(1771)が発見していた。「火の空気」と呼ばれた
ジョゼフ・プリーストリー(1774)が発見。「フロギストン(燃素)のない空気」と命名
N₂: ダニエル・ラザフォード(1772)が発見。「毒のある気体」と命名
Ar: レイリー卿(1894)が発見

初期のCO₂濃度観測

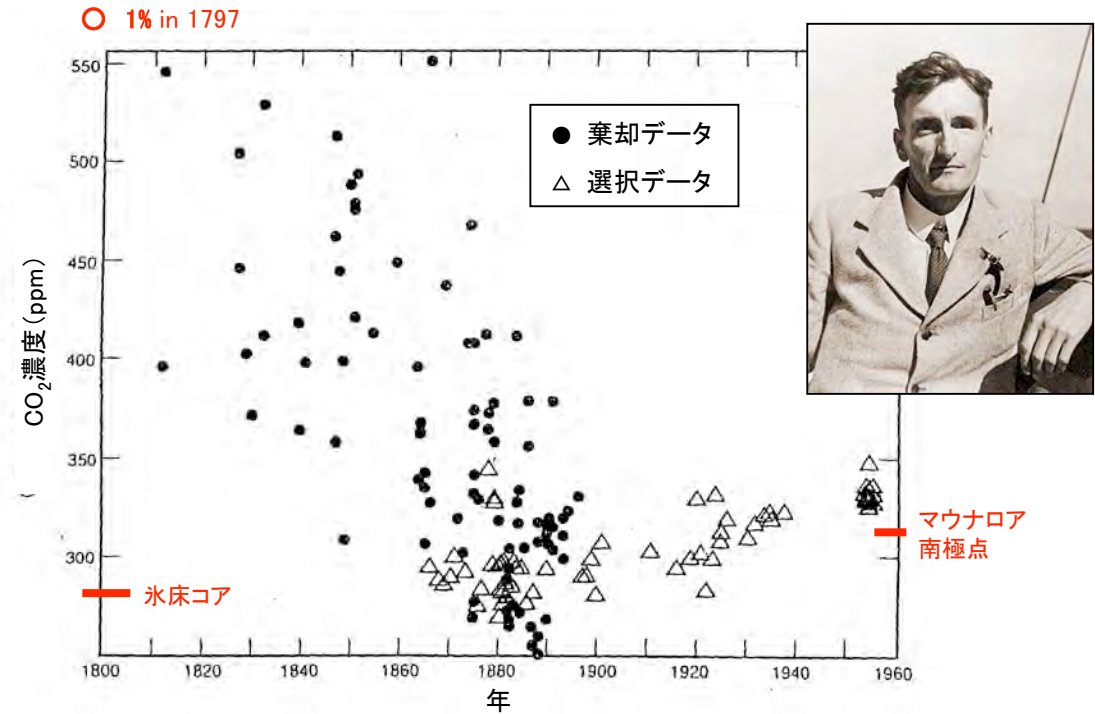
化学的測定



Brown & Escombe (1905)

NaOHにCO₂を吸収させ、HClで中和滴定

ガイ・カレンダーが収集したCO₂データ



- 初期の頃(●)は測定精度が悪い
- 工業化以前の濃度は290 ppm
- 1900年以降に濃度が増加
- 選択データでも全体に濃度が高い

カレンダーの主張:

- 濃度増加の原因は化石燃料消費
- 1900年代前半の気温上昇は化石燃料起源のCO₂によるもの

⇓ 人間活動による温暖化を最初に指摘

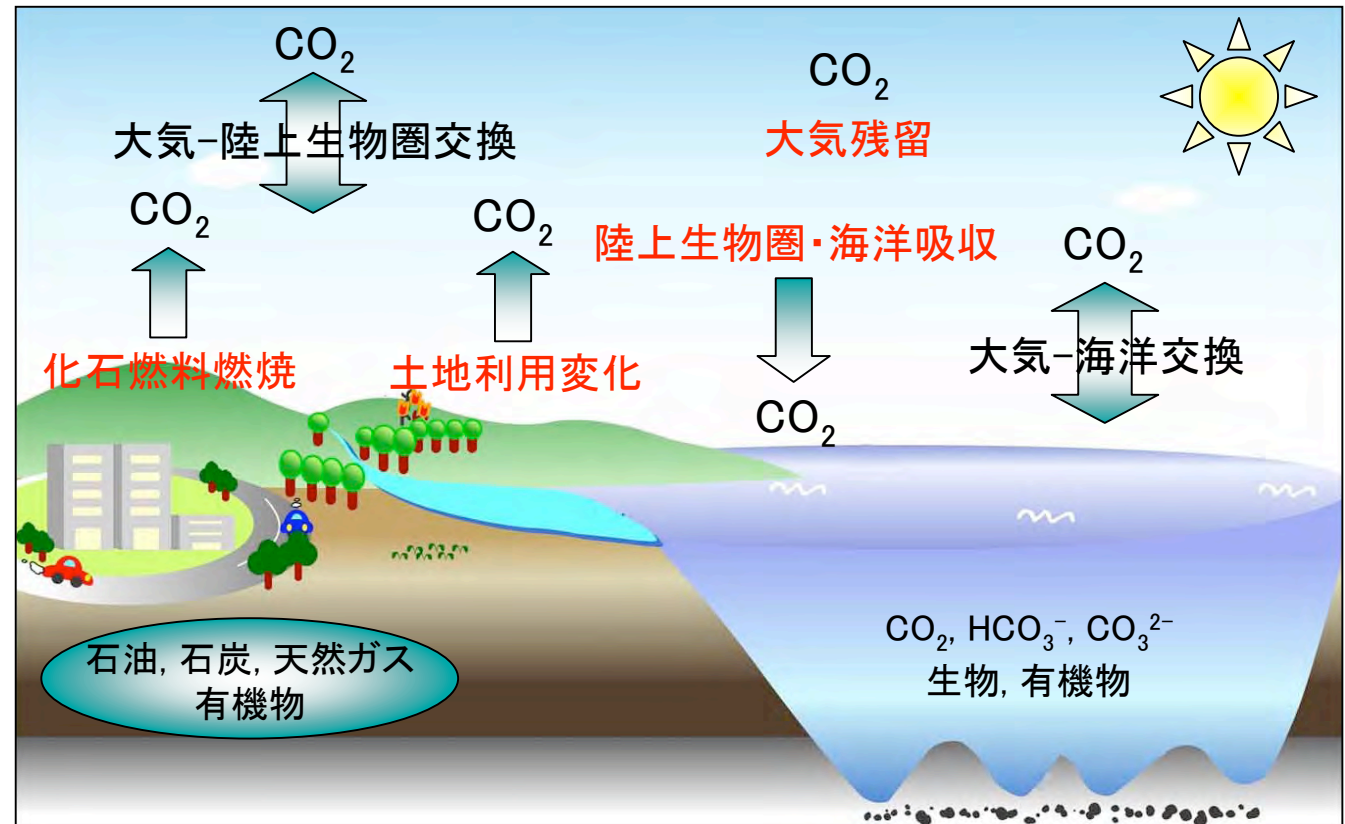
1950年代後半にCO₂の系統的観測や初期気候モデルの開発が開始
1988年の北米での大干ばつをきっかけに研究が本格化

CO₂循環と大気濃度の変動

炭素の貯蔵庫:

- ・ 大気
- ・ 海洋
- ・ 陸上生物圏

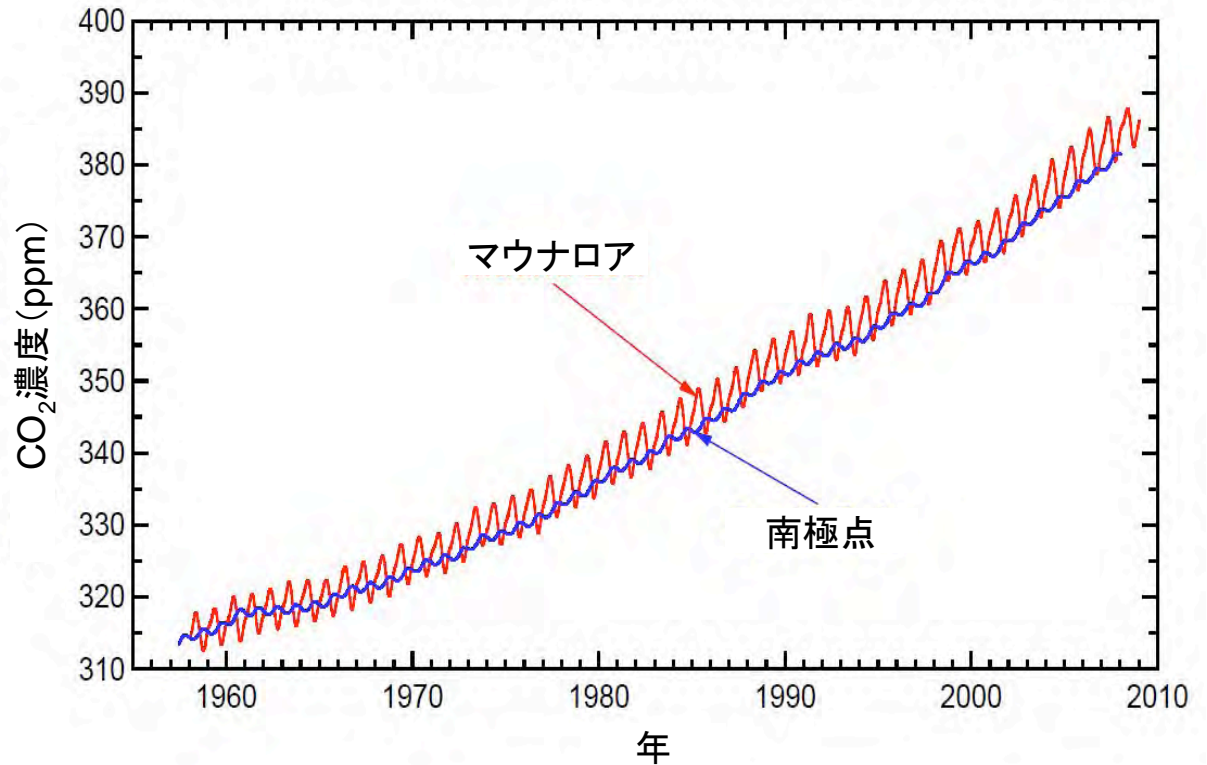
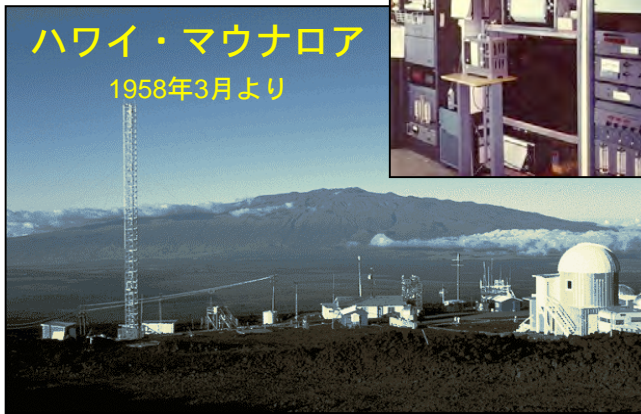
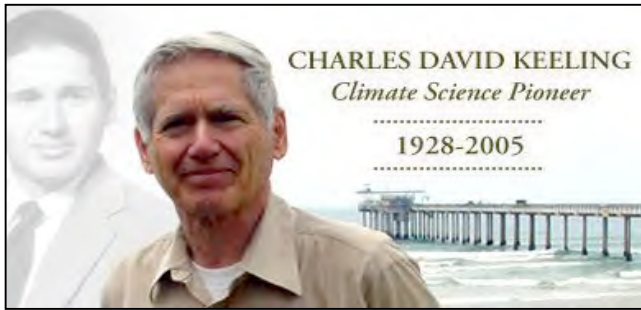
大気-海洋間と大気-陸上生物圏間でCO₂が交換



- ① ↓ 気候・環境変化(エルニーニョ現象や火山噴火、氷期-間氷期サイクル)
大気濃度が増加
- ② 人間活動による濃度増加
- ③ 循環と気候の相互作用: 温暖化 → 循環の変化 → 濃度変動(増加)



CO₂濃度の系統的観測

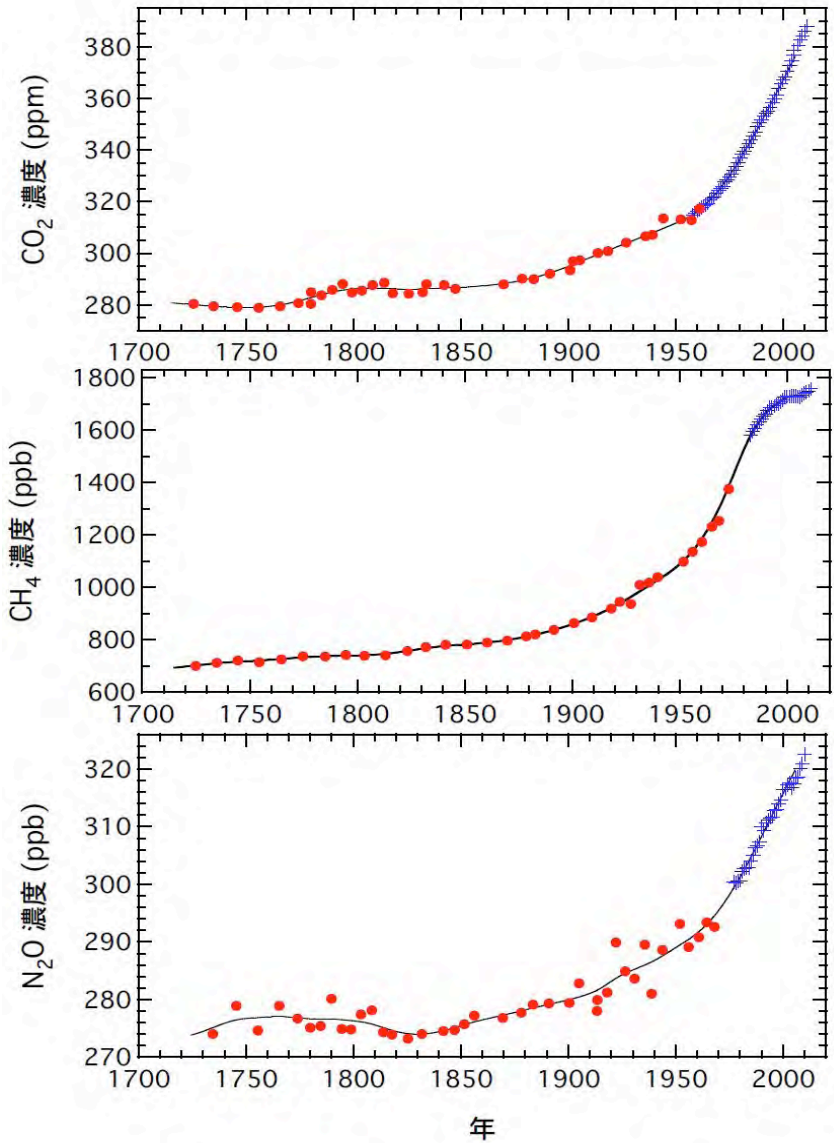
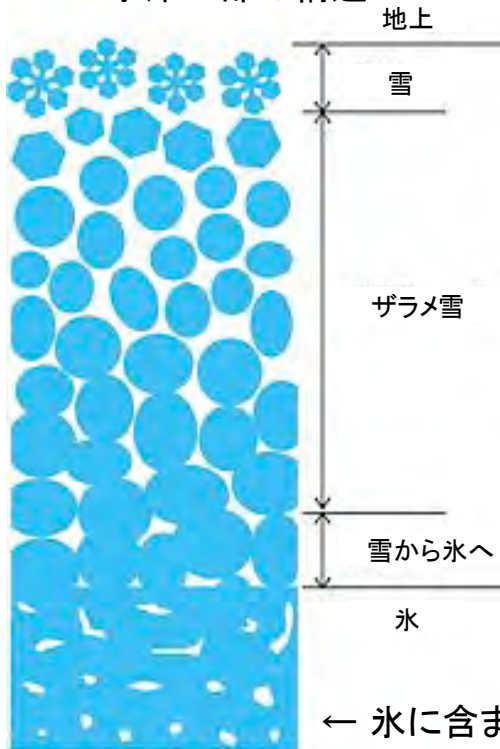


- 季節変化と年々変動を伴って、経年増加している (1958年は315ppm、2012年は393ppm)
- 季節変化は南極点よりマウナロアで大きい
- 増加傾向は時間とともに強まっている (1950年代は0.7ppm/年、最近は2.1ppm/年)
- 南北差が時間とともに拡大している

CO₂濃度は何時頃から増加したのか？

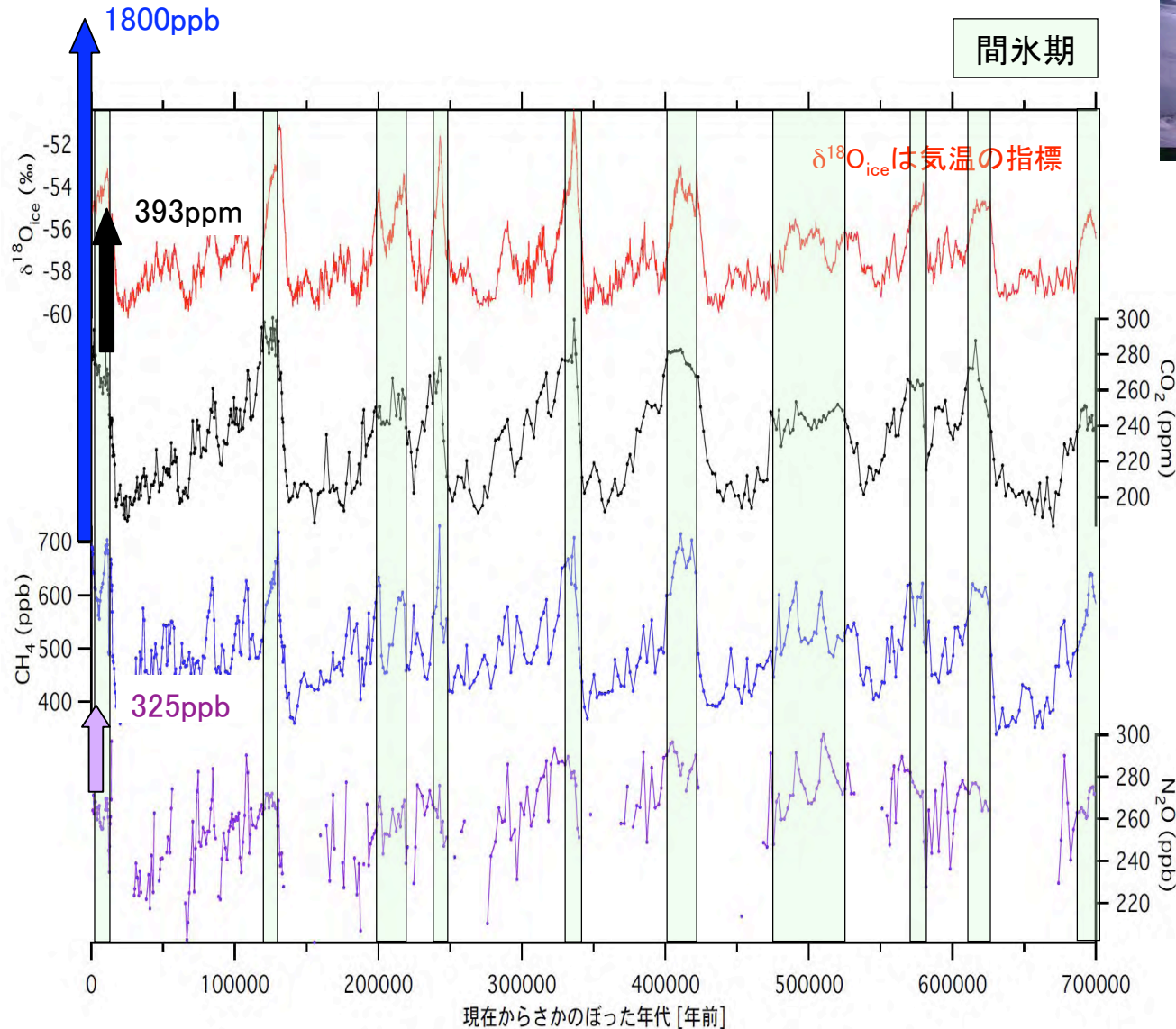


氷床上部の構造



CH₄は1000 ppb以上、N₂Oは50 ppb以上も増加

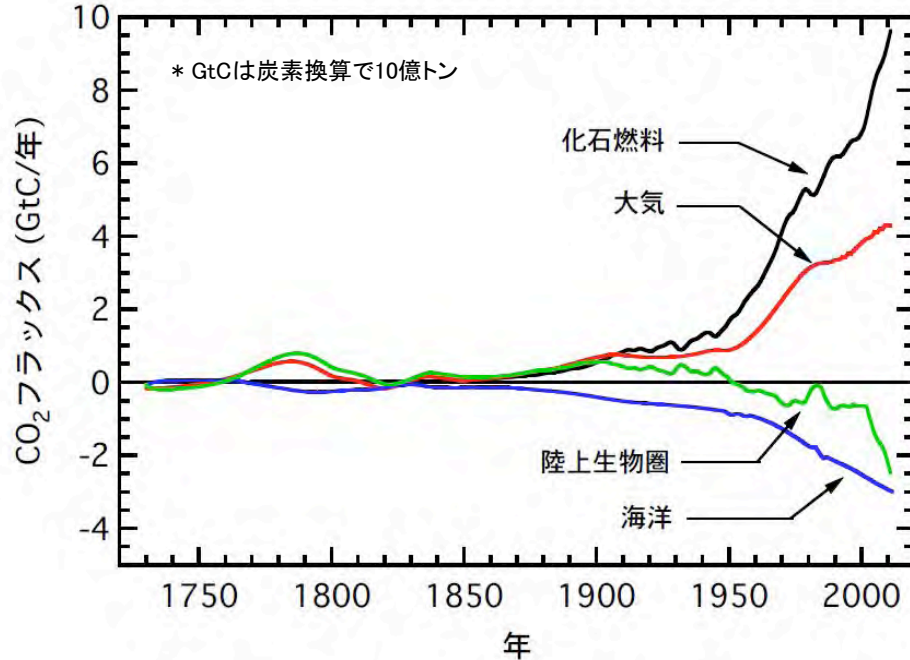
過去70万年間の濃度変動 (ドームふじ深層氷床コア)



- 濃度は間氷期に高く、氷期に低い
- 濃度は温度と良く対応して変化
- 氷期の低濃度は気候変動に伴う循環の変化が原因 (CO₂は海が吸収、CH₄とN₂Oは発生量が低下)
- 最近のCO₂, CH₄, N₂O濃度は70万年間で最も高い
- 氷期回復期と比べると、近年のCO₂増加の速度は約40倍 (CH₄は約120倍)

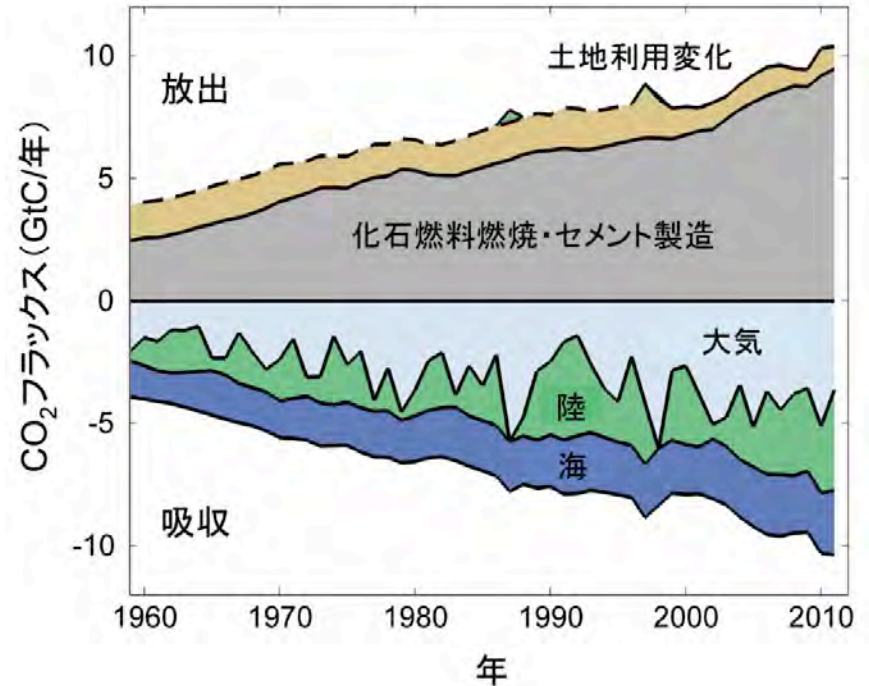
人為起源CO₂の収支

大気CO₂濃度の長期変動を全球炭素循環モデルで解析した結果



- 化石燃料燃焼による放出は20世紀半ばまでは漸増、その後急増
- 大気残留も20世紀半ば以降に急増。1980-2000年に停滞、その後増加
- 陸上生物圏は20世紀半ばまでは放出源、それ以降は吸収源
- 海洋は吸収源。特に20世紀半ば以降に増大

1959-2011年の人為起源CO₂の収支



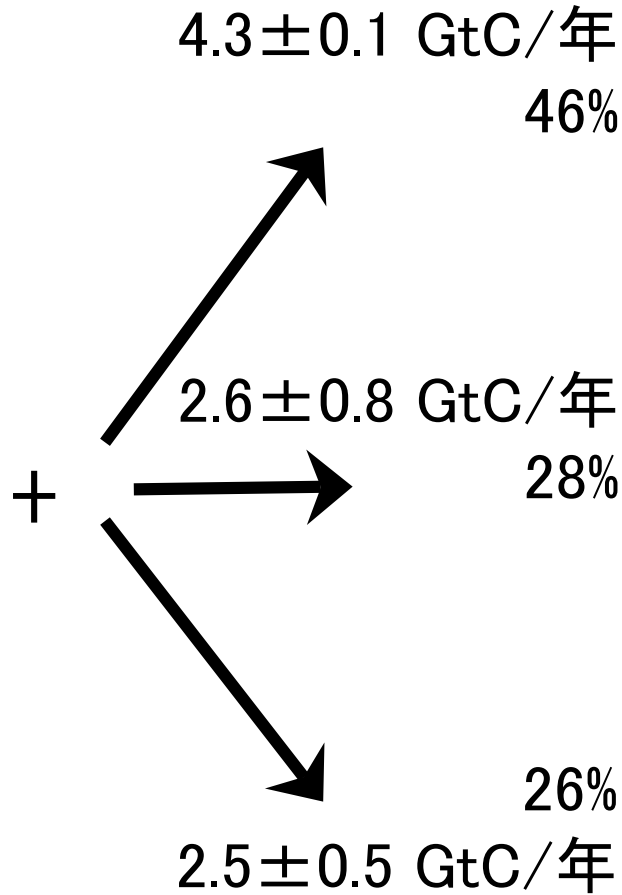
- 化石燃料燃焼・セメント製造からの放出は経年増加
- 土地利用変化による放出は、1960-1990年代は一定、2000年代には多少減少
- 海洋吸収は着実に増加
- 陸域は吸収(正味でも)。1990年代に急増。年々変動が大きい
- 大気残留は経年増加。年々変動は主に陸域の影響

2002-2011年の平均的な人為起源CO₂の収支

8.3 ± 0.4 GtC/年 90%

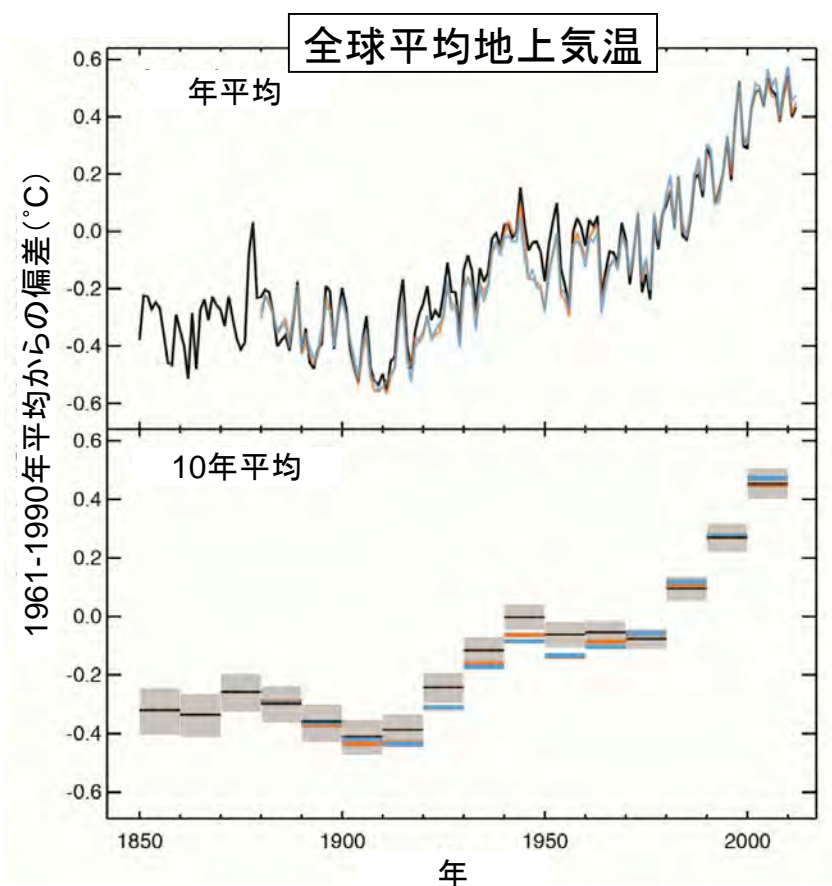


1.0 ± 0.5 GtC/年 10%

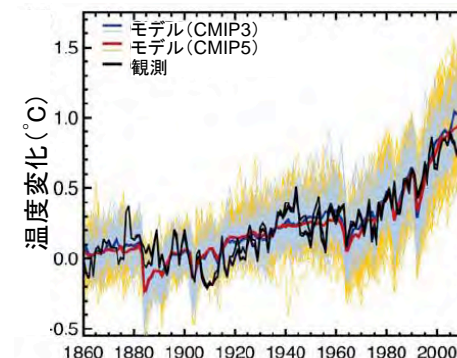


- 化石燃料燃焼・セメント製造と大気残留以外の推定値の誤差は大きい
- 他の解析方法による結果と必ずしも一致していない
- 放出・吸収の地理的情報が不十分

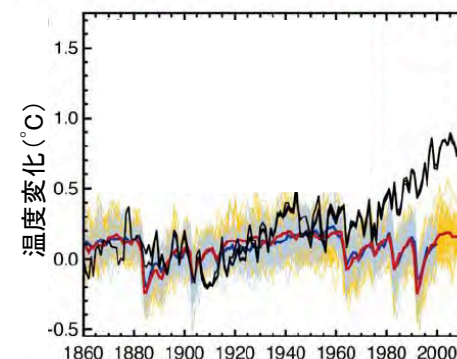
温暖化は始まっているか？



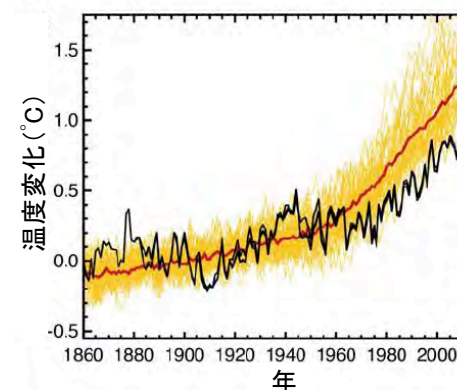
- 1850-2012年の期間に0.85°C上昇
- 直近の3回の10年平均気温は、1850年以降のどの10年間より高い



自然起源強制力(太陽活動や火山噴火)と人為起源強制力(温室効果気体や硫酸エアロゾル)を考慮



自然起源強制力のみを考慮



温室効果気体のみを考慮

- 自然起源と人為起源を考慮すると再現可能

20世紀半ば以降に観測された気温上昇は、人為起源の温室効果気体の増加による可能性が極めて高い(IPCC AR5)

気候モデルによる将来予測

IPCC AR5 (CMIP5) では代表的濃度経路 (RCP) と呼ばれるシナリオが使用

RCP2.6 低位安定化シナリオ
(昇温を2°C以下)

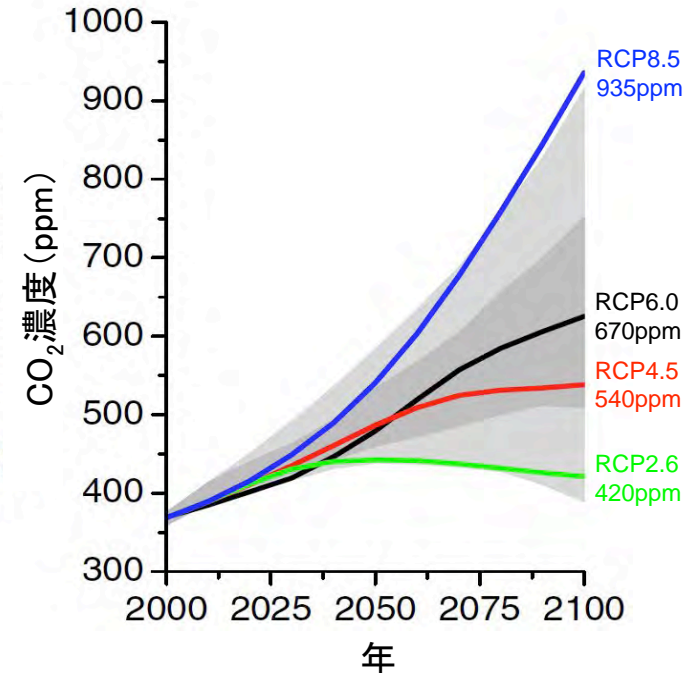
RCP4.5 中位安定化シナリオ

RCP6.0 高位安定化シナリオ

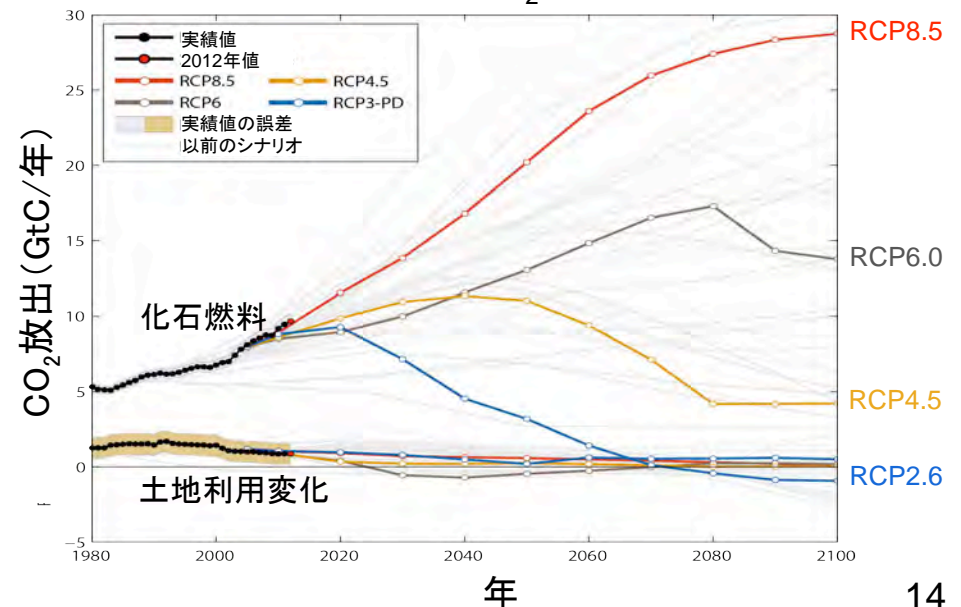
RCP8.5 高位参照シナリオ

- 土地利用変化からのCO₂放出は少ない
- 化石燃料消費が主な放出源
- 濃度を安定あるいは減少させるためには、化石燃料CO₂放出の大幅な削減が必要
- RCP2.6では2070年以降はマイナスの放出(大気からCO₂を除去)

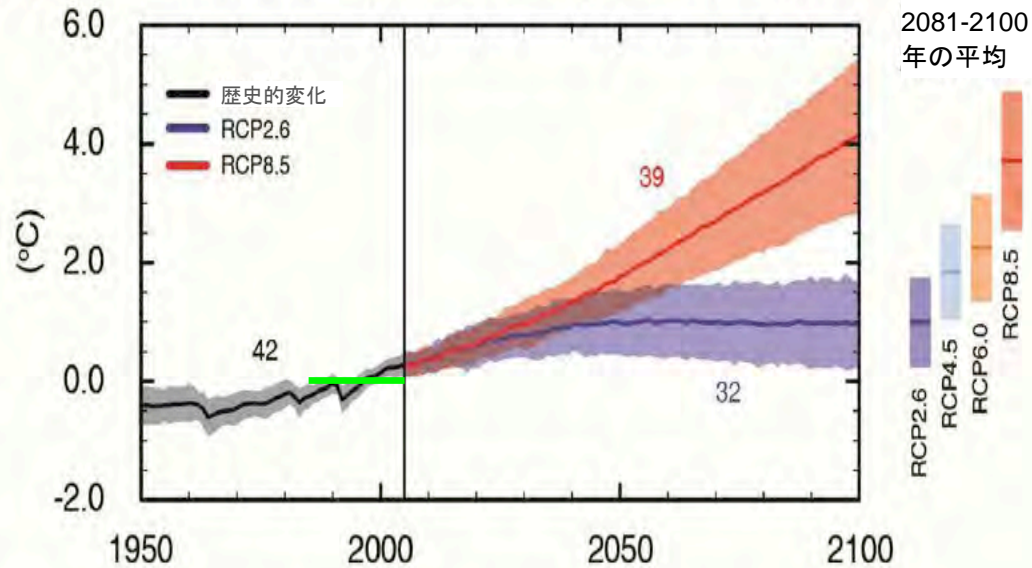
各シナリオのCO₂濃度変化



各シナリオのCO₂放出量変化

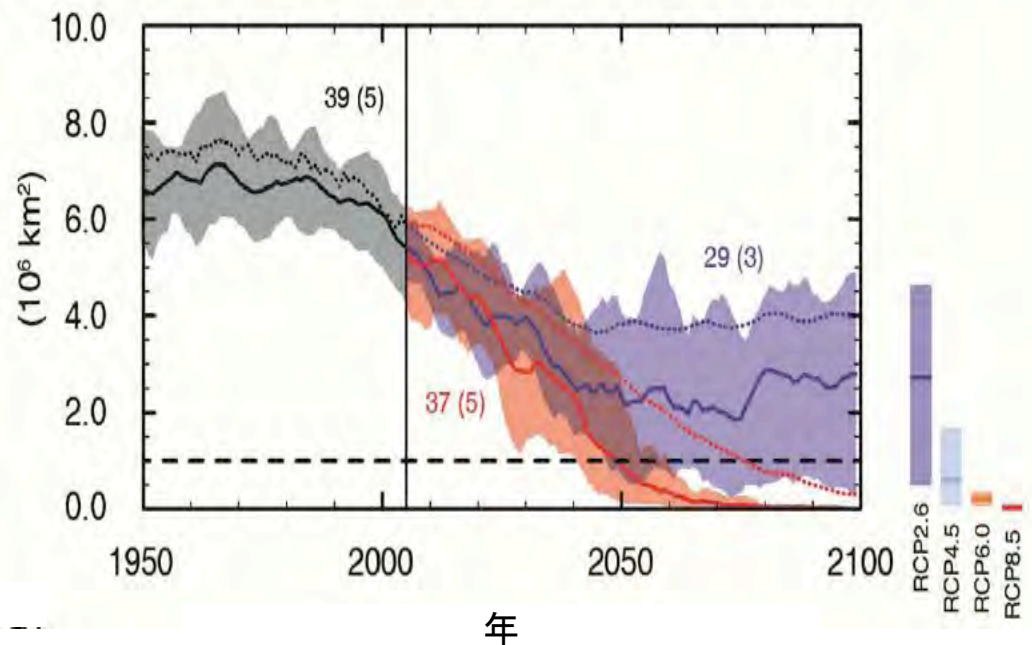


全球平均地上気温変化



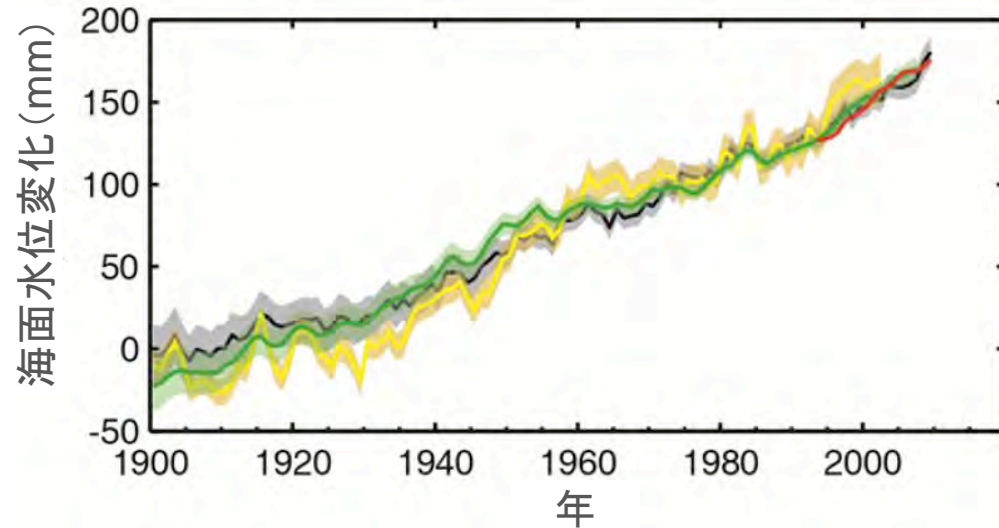
- 1986-2005年と比べると、2016-2035年には0.3-0.7°Cの上昇
- 21世紀末にはRCP2.6で0.3-1.7°C、RCP8.5°Cで2.6-4.8°Cの上昇

北半球の9月における海氷面積

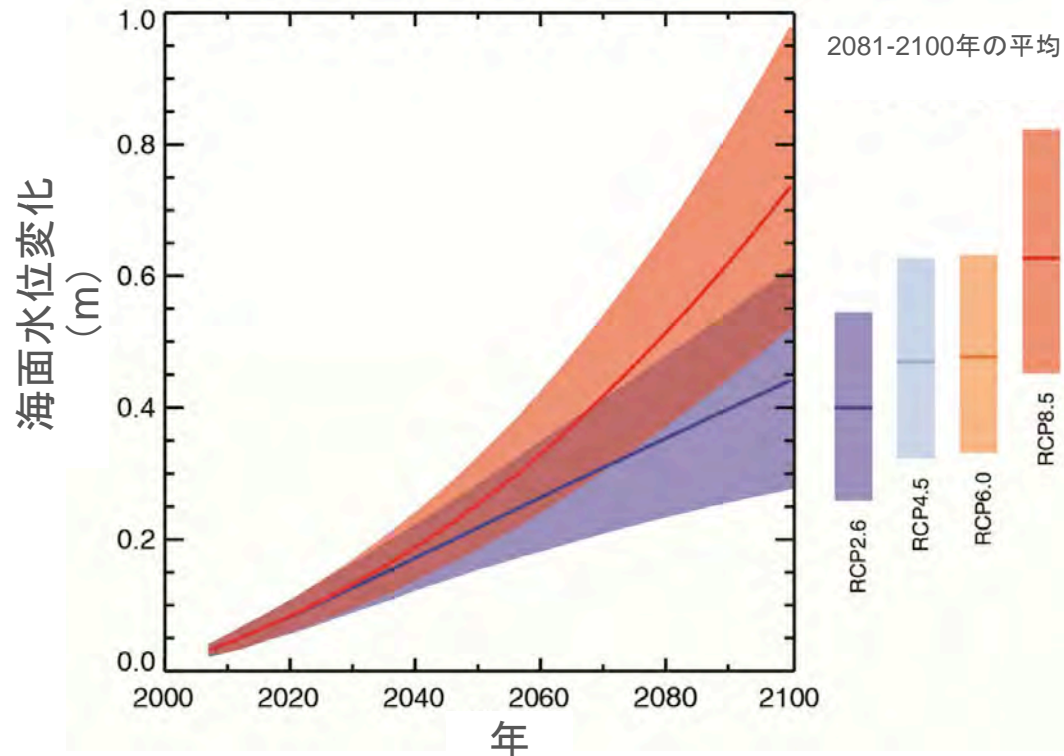


- 極端な高温・降水現象の多発、海水温の上昇、海洋循環の変化、北極海の家氷域・氷河・北半球春季の積雪面積の減少、台風の巨大化、……

全球平均海面水位の上昇



- 1901-2010年に19cmの上昇
- 1901-2010年は1.7mm/年、1993-2010年は3.2mm/年の上昇率
- 主因は氷河の融解と海水の熱膨張。その他、グリーンランド氷床と南極氷床の融解、陸域の貯水量の変化



- 海水の熱膨張、氷河とグリーンランド氷床の融解によって海面水位上昇は続く
- 21世紀末の海面水位の上昇は、RCP2.6で26-55cm、RCP8.5で52-98cm

地球温暖化におけるCO₂の重要性と困難性

- 温暖化の主因はCO₂増加にある
- 増加原因は人間の生存にある(対策がとりにくい)
- 温暖化への対応に必要なCO₂循環の理解が未だ不十分
 - 人為起源CO₂収支の推定誤差が大きい
 - 温暖化すると陸上生物圏がCO₂放出源となる
 - 温暖化や海洋の酸性化によって海洋のCO₂吸収能力が低下
- 大気中のCO₂濃度を上げてしまうと、高濃度が長期にわたって続く
← 早めの緩和策(急激な放出の抑制)と適応策が不可欠

