

# 地球温暖化の科学と その不確実性をめぐって

国立環境研究所  
気候変動リスク評価研究室長

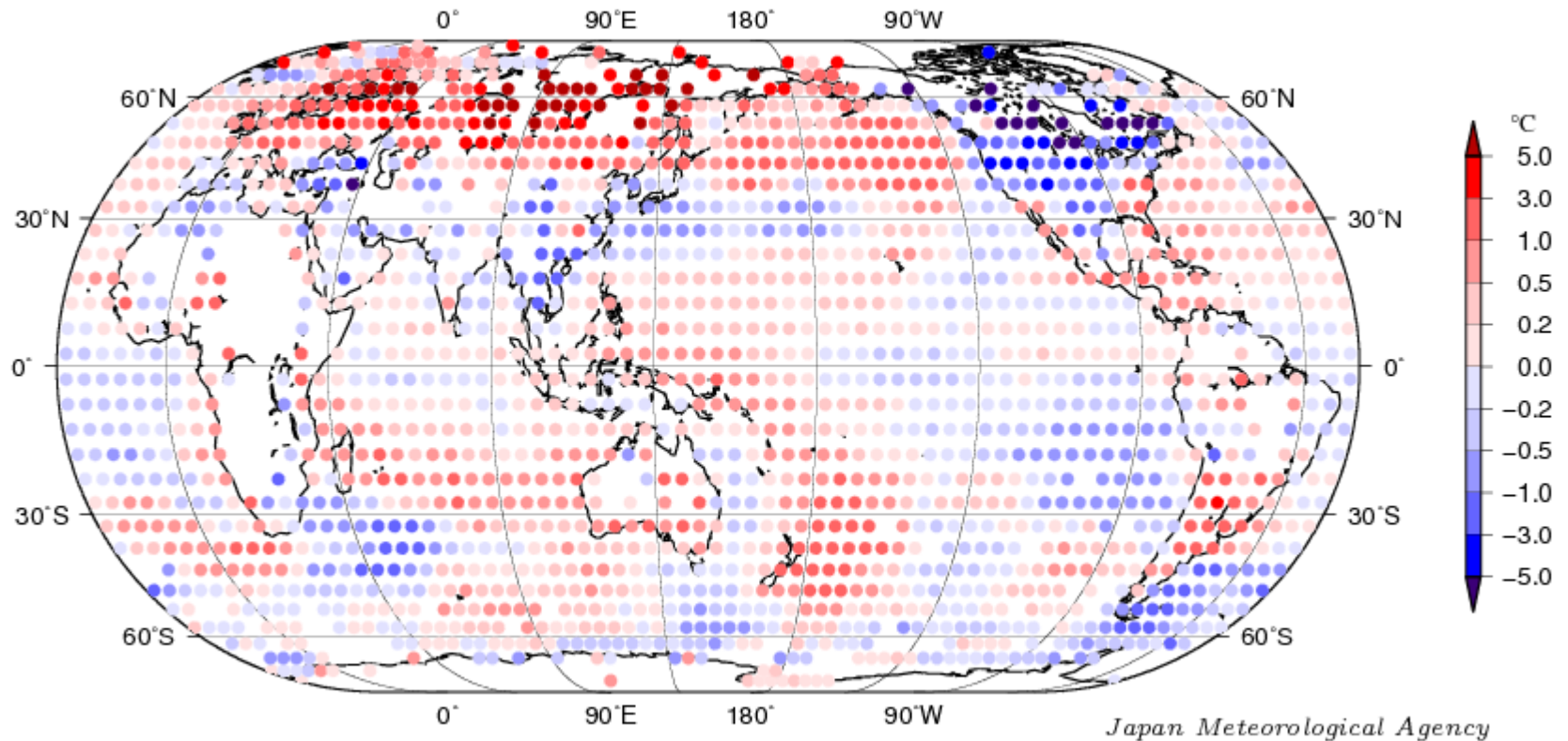
江守 正多

# 講義の構成

1. 地球温暖化概論
2. 気候モデルとその信頼性
3. 地球温暖化の懐疑論
4. 地球温暖化のリスクにどう向き合  
うか

# 日本とアメリカで寒波 →本当に温暖化してるの？

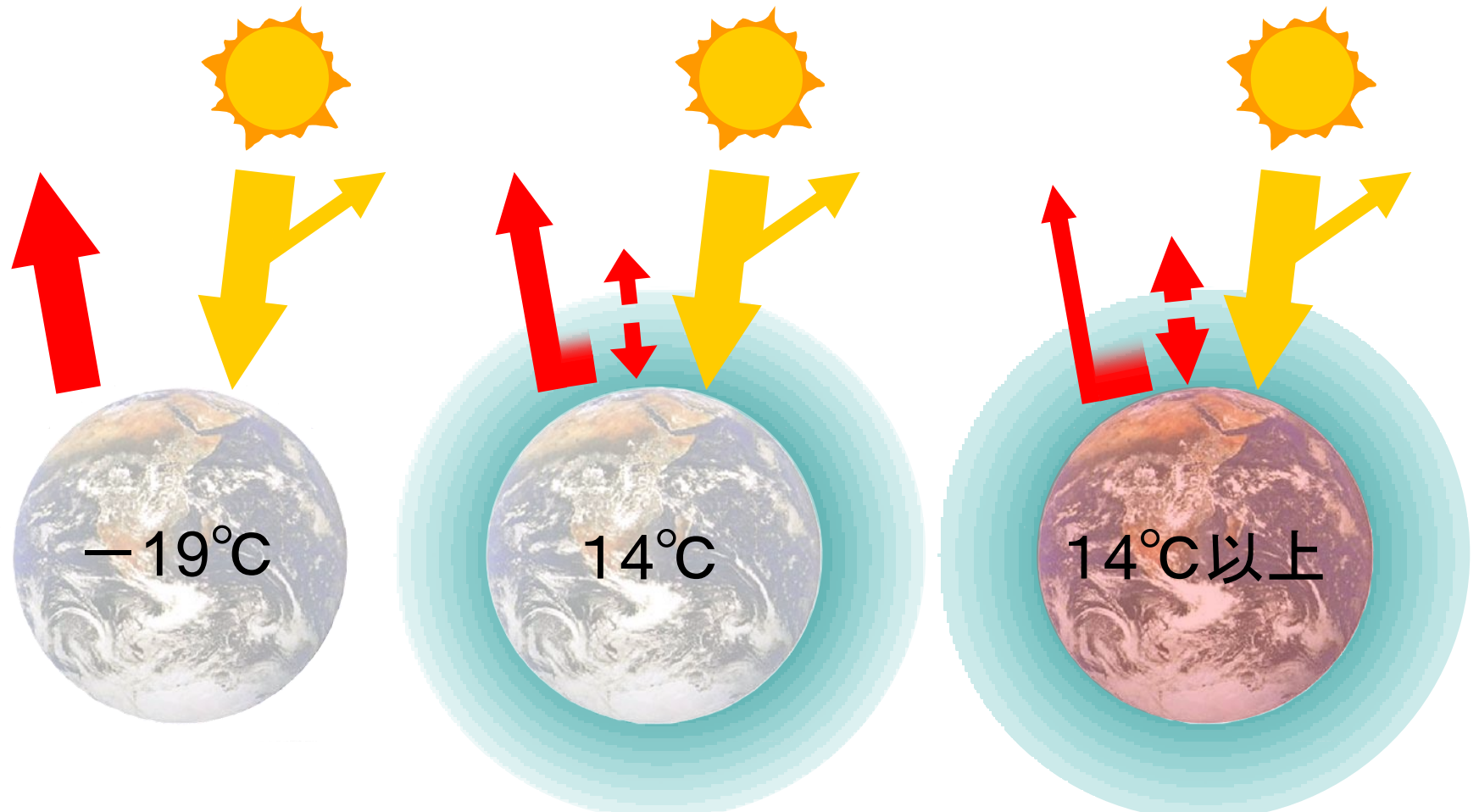
月平均気温偏差 2013年12月



図中の丸印は、 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$  格子で平均した 1981-2010 年からの偏差を示す。

# 1. 地球温暖化概論

# 地球温暖化のしくみ



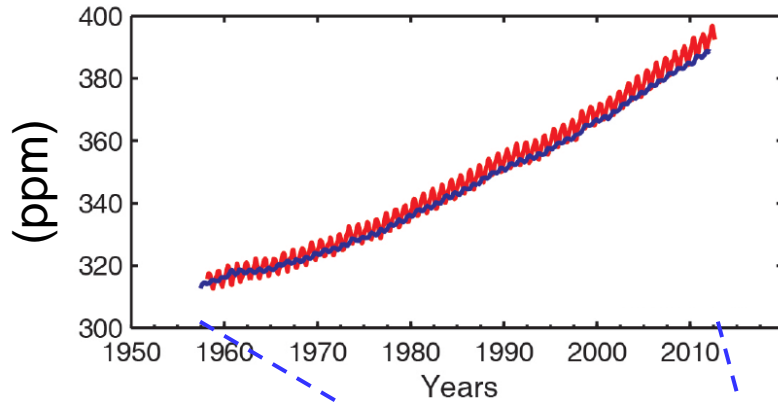
1. 温室効果が無かったら...

2. 温室効果があるので...

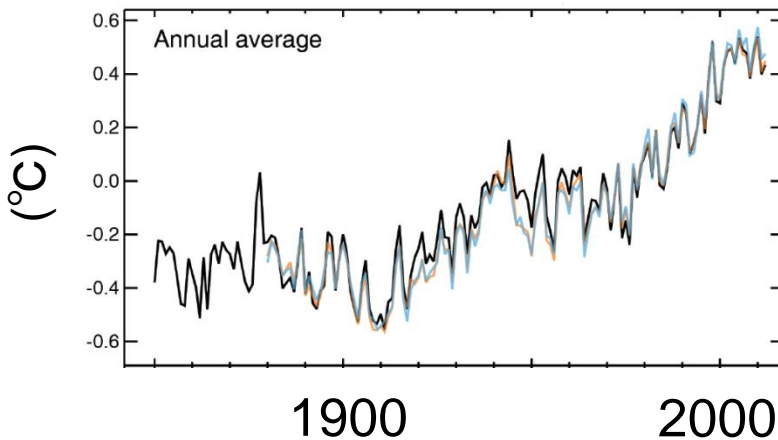
3. 温室効果が強まると... 5

# 温室効果ガス濃度と世界平均気温・海面水位は20世紀に急激に上昇している

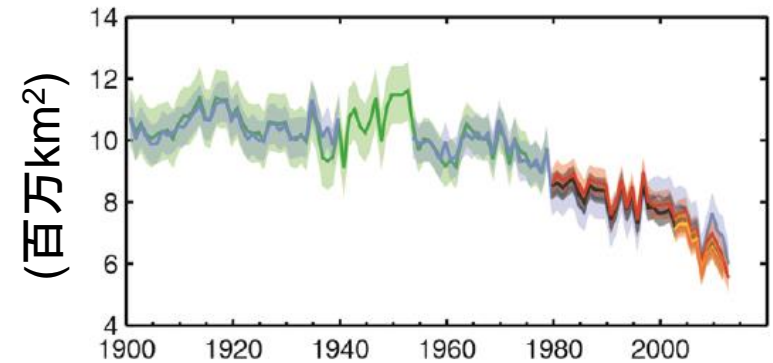
二酸化炭素濃度



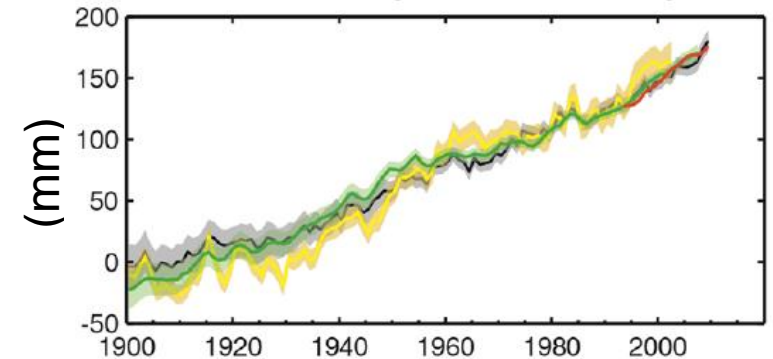
世界平均気温偏差



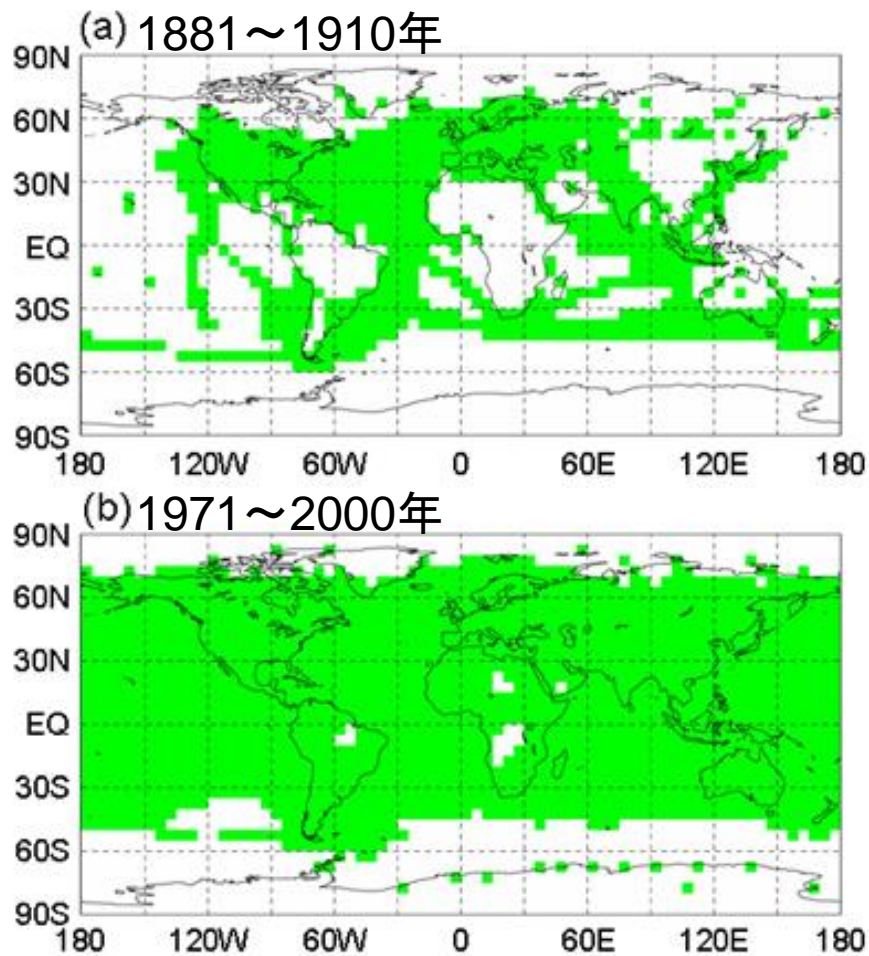
夏の北極海海氷面積



世界平均海面水位

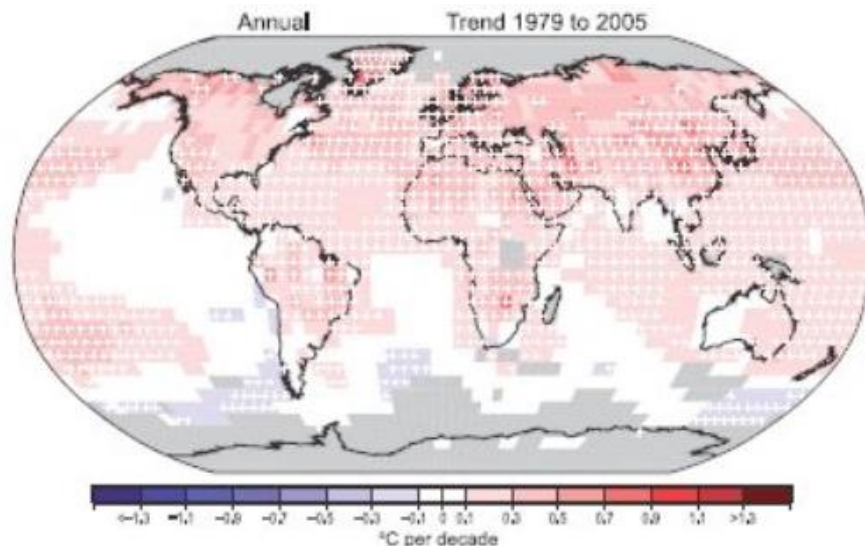


# 気温観測データの地理的な密度



月平均気温データが50%以上存在する  
5° × 5° の格子点

1979年から2005年までの  
気温変化トレンド



(IPCC WG1 AR4 Fig. 3.9)

# 近年の気温上昇は人間活動のせい？

## 産業革命以降の気候変化要因

1750年を基準とした放射強制力

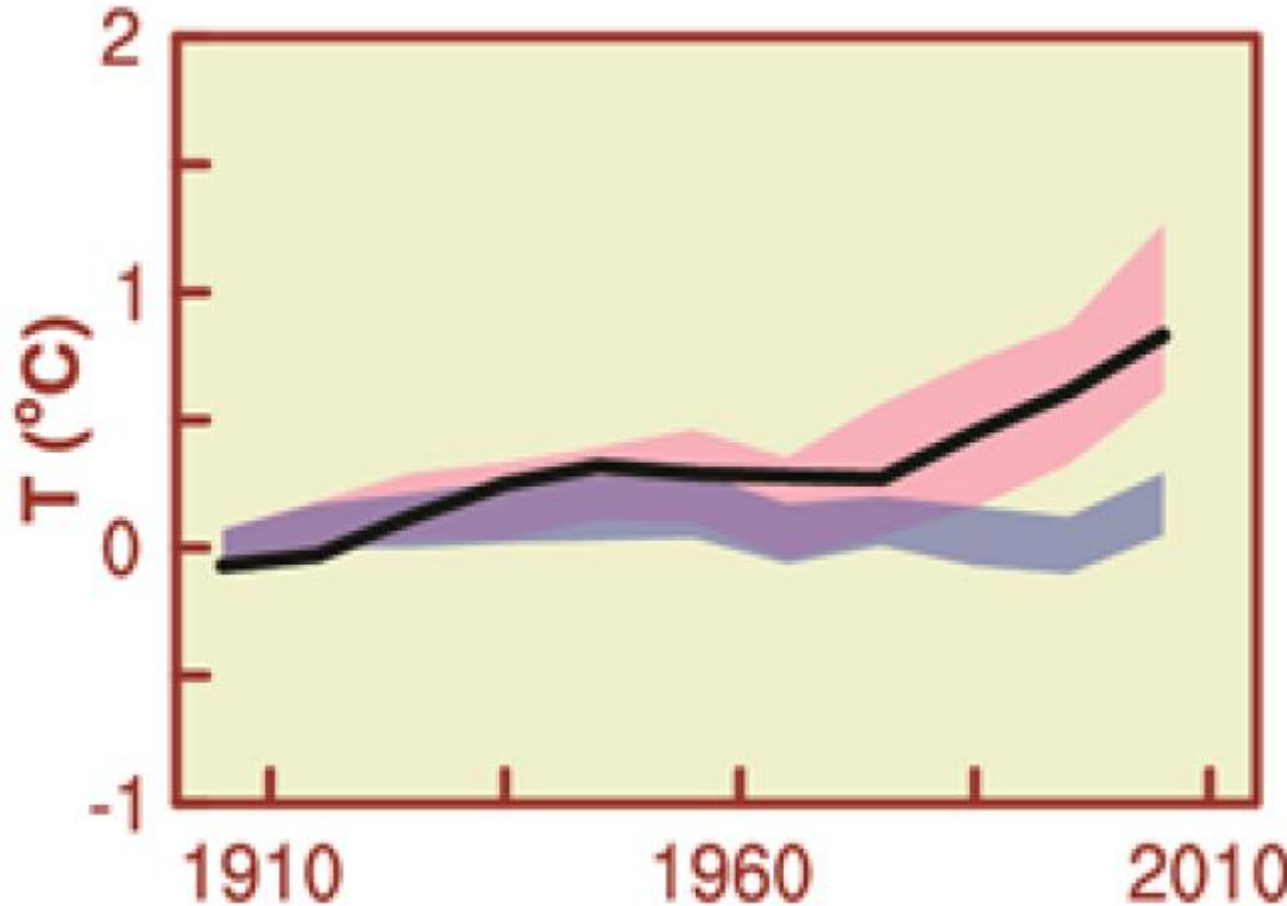


冷却効果

加熱効果



20世紀半ば以降の世界平均気温上昇の半分以上は、人為起源の要因による可能性が極めて高い(95%以上)

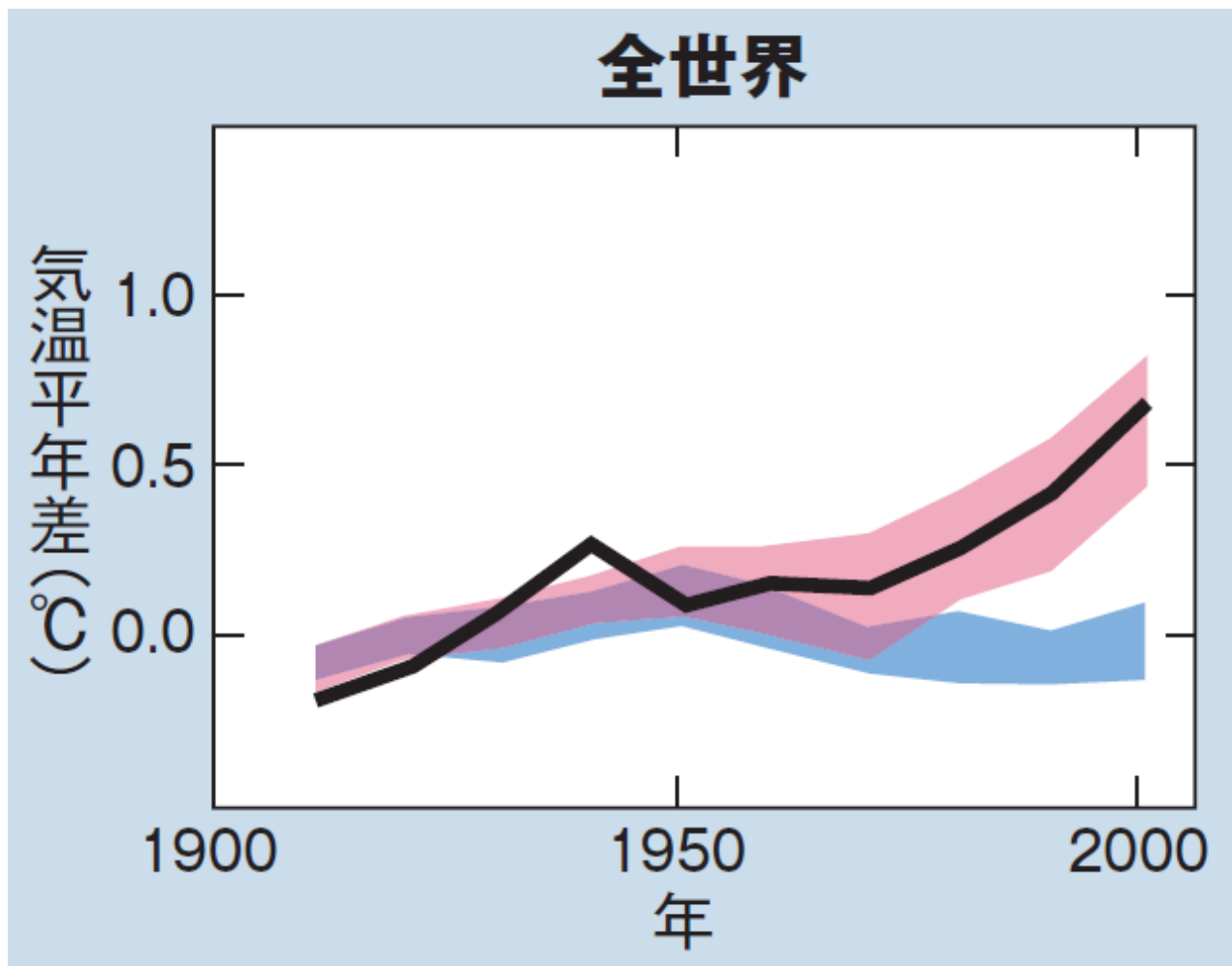


黒：観測結果

赤帯：  
自然要因  
(太陽+火山)  
+人為要因  
(温室効果ガス  
等)を考慮したシ  
ミュレーション

青帯：  
自然要因  
のみ考慮したシ  
ミュレーション

20世紀半ば以降に観測された世界平均気温の上昇のほとんどは、人為起源の温室効果ガスの増加による可能性が非常に高い



黒：観測結果

赤帯：  
自然要因  
(太陽+火山)  
+人為要因  
(温室効果ガス  
等)を考慮したシ  
ミュレーション

青帯：  
自然要因  
のみ考慮したシ  
ミュレーション

# 将来をどうやって予測するか

将来の世界の社会経済発展



温室効果ガス等の排出量



温室効果ガス等の大気中濃度



気候の変化



人間社会・生態系への影響



# 将来の世界の社会経済はどんな方向に発展するか？→排出量はどう変わるか？

予測は不可能 → 様々な場合(シナリオ)を考える

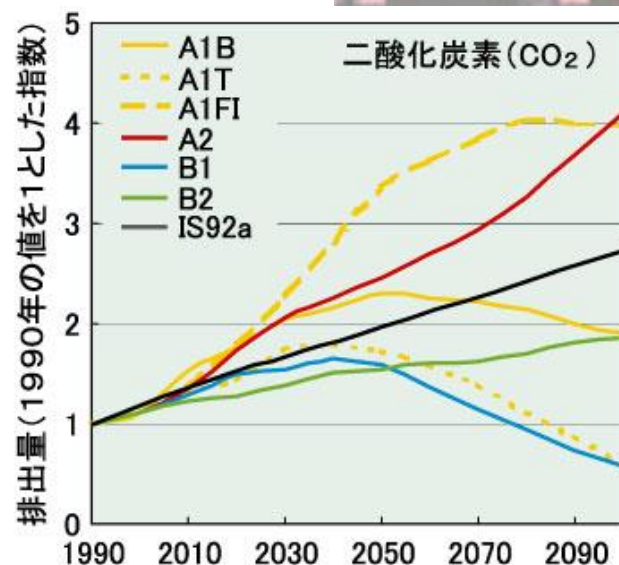
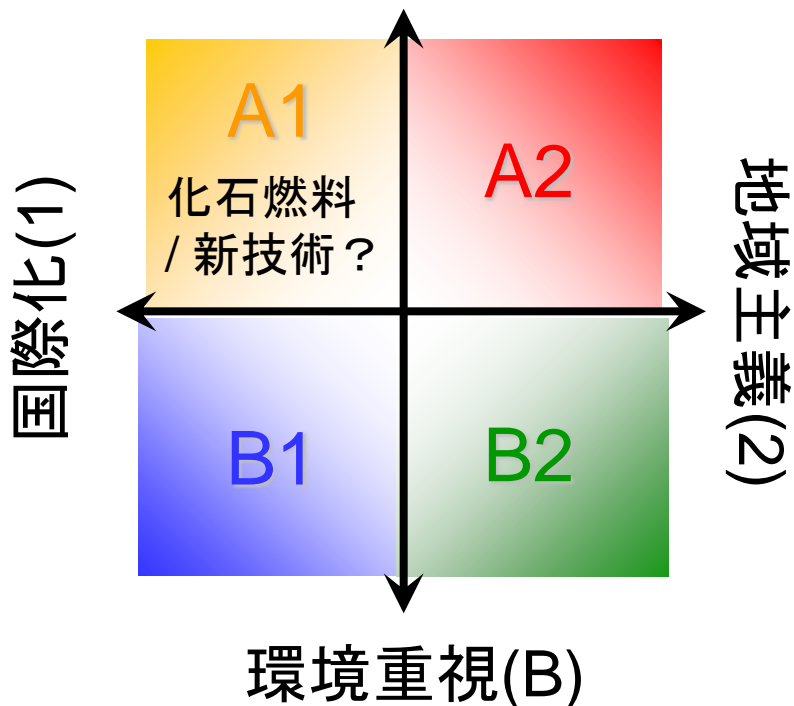
様々な将来世界像



人口, 経済活動,  
エネルギー, 技術等

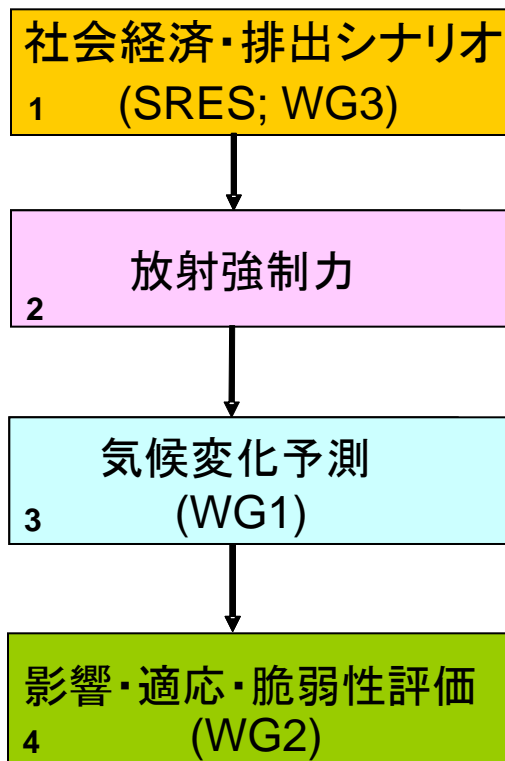


温室効果ガス等排出量



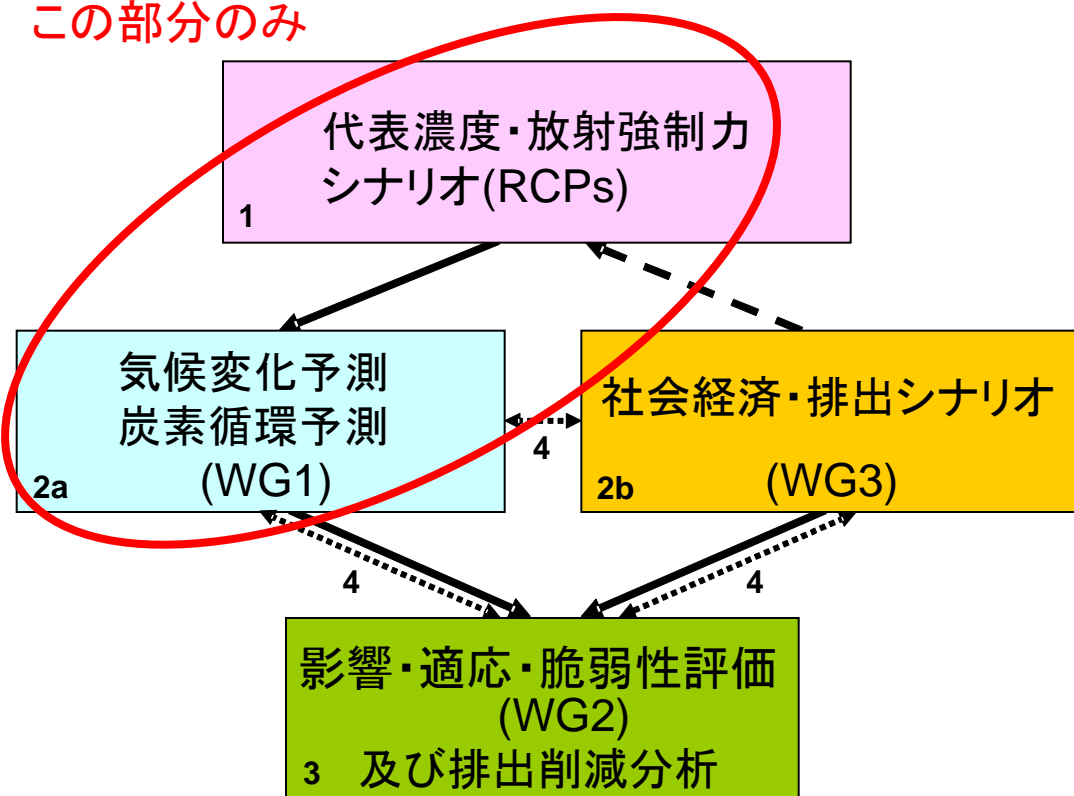
# シナリオの取り扱いの前回との違い

AR4 (2007)  
逐次アプローチ



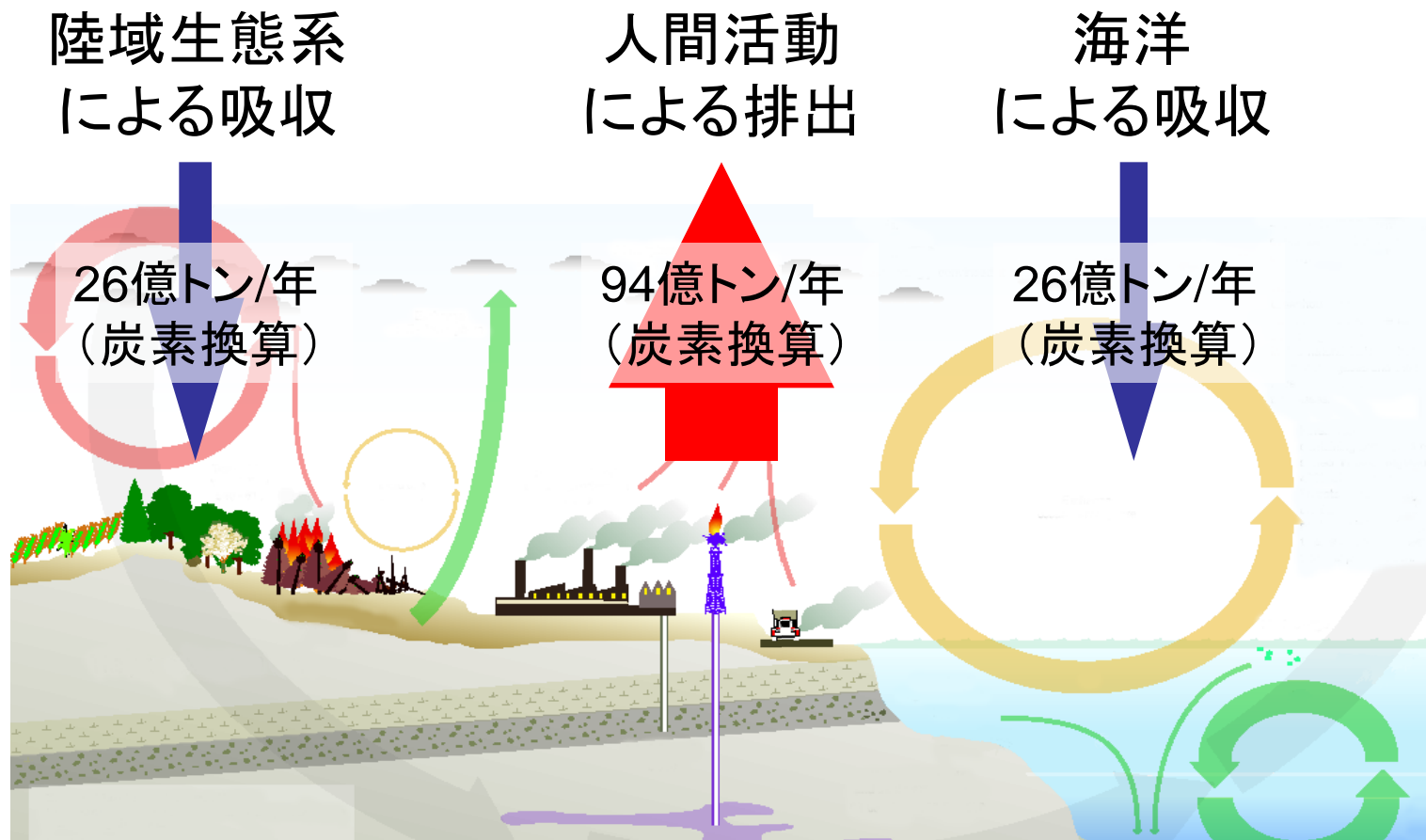
AR5 (2013)  
並列アプローチ

今回の発表は  
この部分のみ



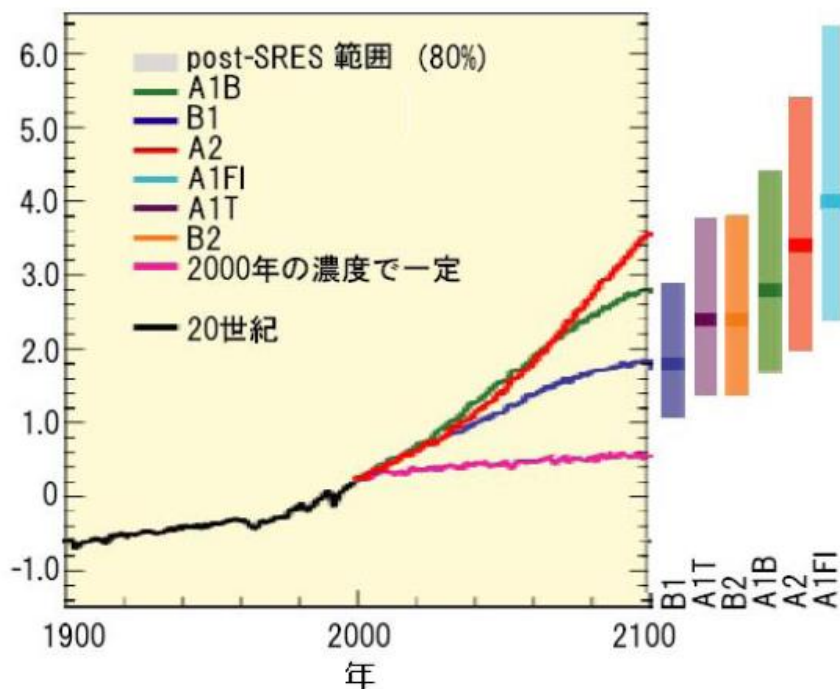
# 排出された二酸化炭素のどれだけが 大気中にのこるか？

地球の炭素循環：大気残存量＝排出量－吸収量



(図：UNEP Vital Climate Change Graphicsより，値：Global Carbon Project, 2003-2012の平均)

# 予測される100年後の気温上昇量は？



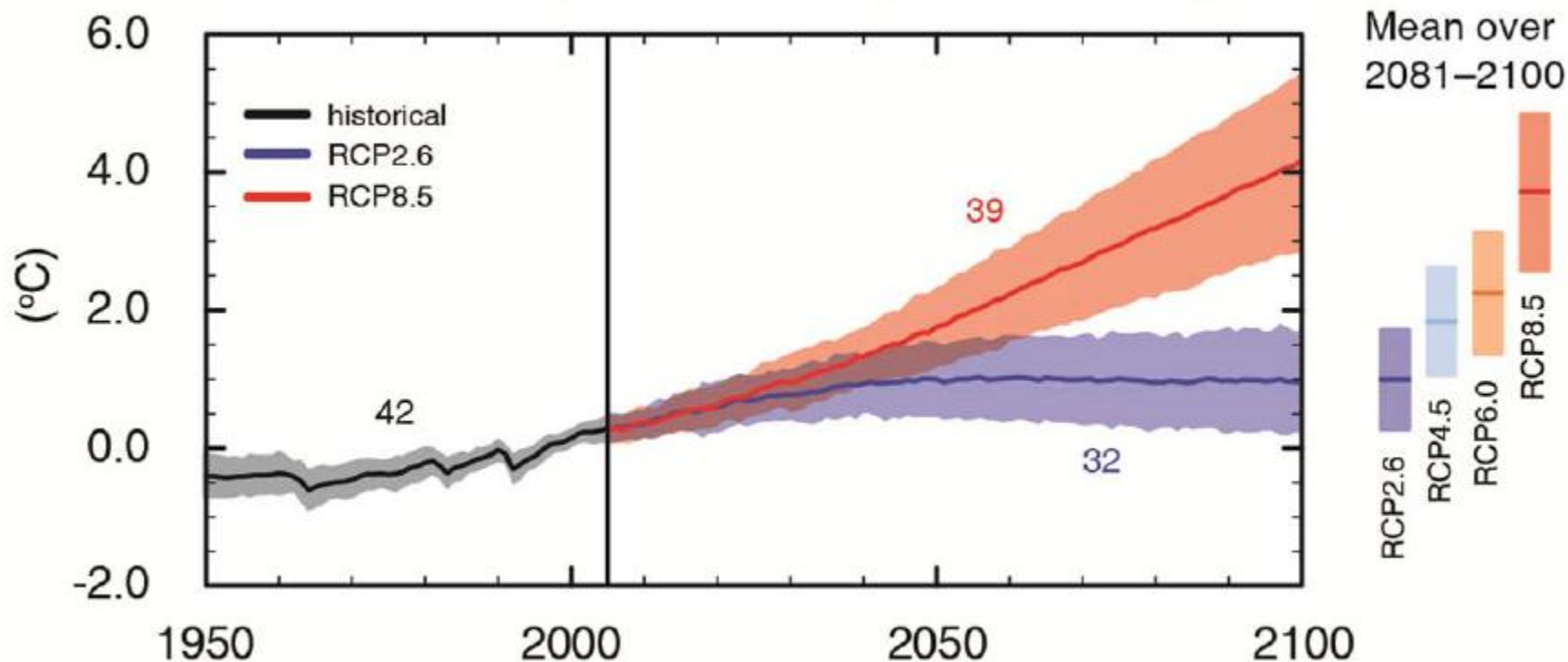
IPCC AR4 SYR SPM

社会の発展の仕方に依存  
科学的な予測にも幅

(2007年2月2日夕刊見出し)

- 朝日新聞  
「世界の気温『100年後1.8～4度上昇』」
- 毎日新聞  
「IPCC報告書、気温上昇『最悪6.4度』」
- 読売新聞  
「今世紀末最悪6.4度上昇」
- 日本経済新聞  
「地球平均気温、今世紀末1.1-6.4度上昇」

# 予測される100年後の気温上昇量は？

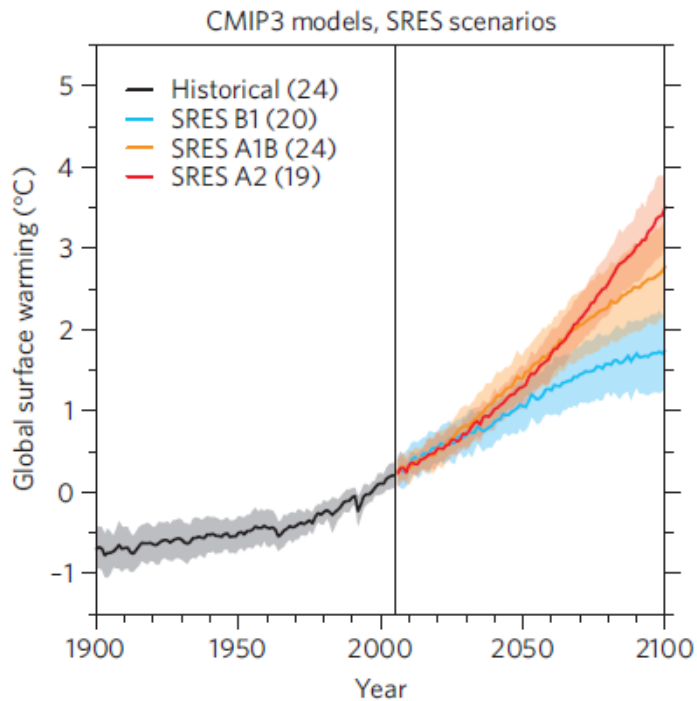


社会の発展の仕方と対策の大きさに依存  
科学的な予測にも幅

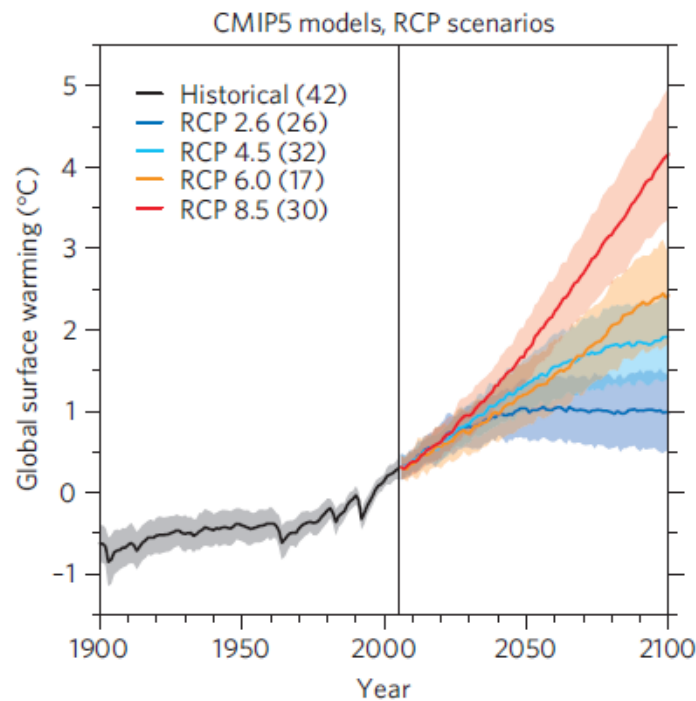


# シナリオの違いを考慮すると 前回の予測とほぼ同じ

## AR4 (2007) の予測

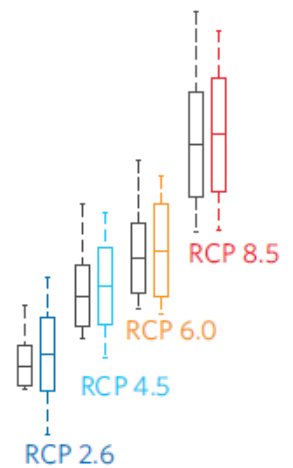


## AR5 (2013) の予測

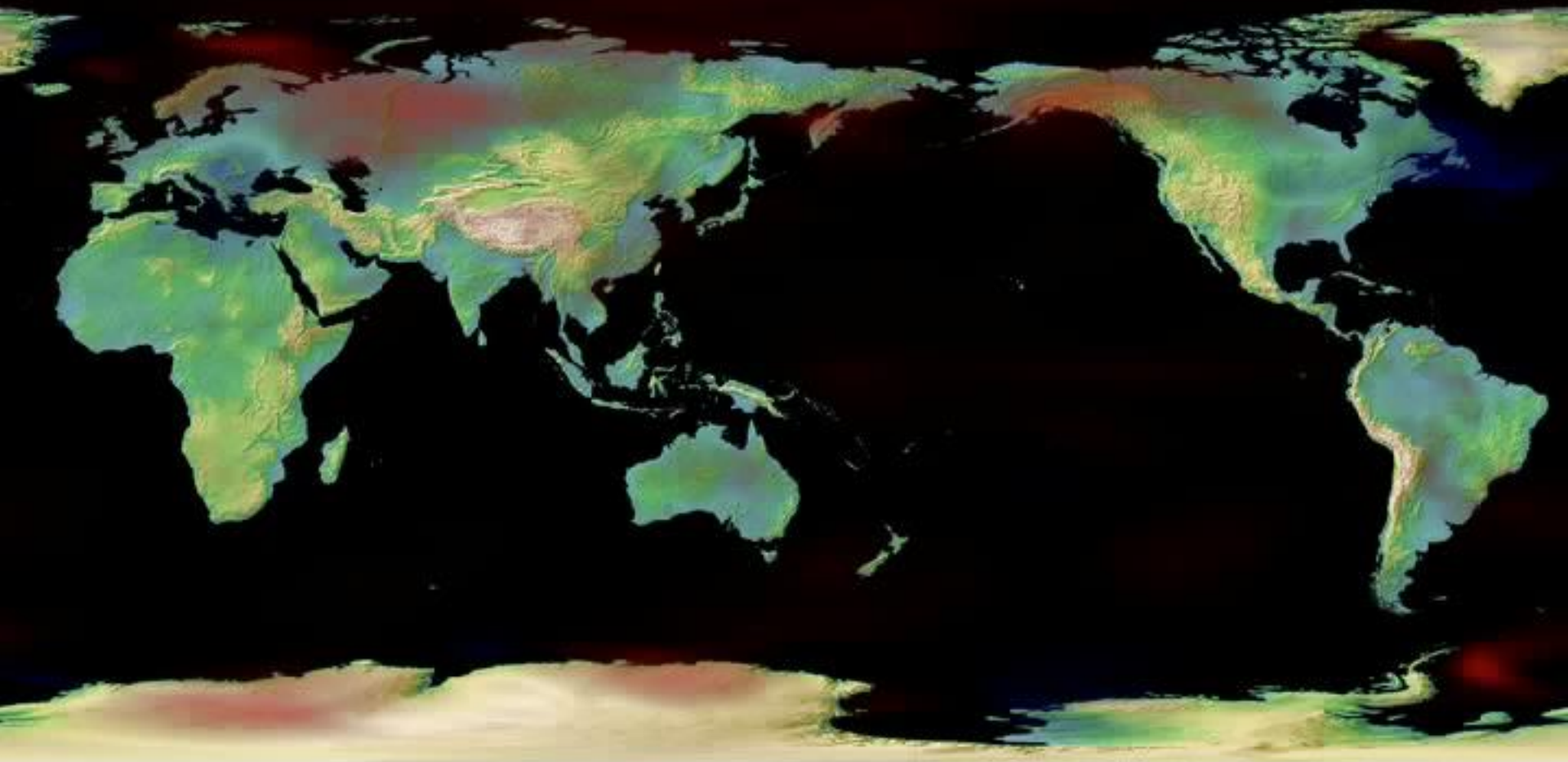


黒: AR4の予測を  
AR5のシナリオ  
に換算して比較

Comparison with  
emulated CMIP3 RCP



# 20～21世紀の地表気温変化シミュレーション



1950

-12 °C

-6 °C

0 °C

+6 °C

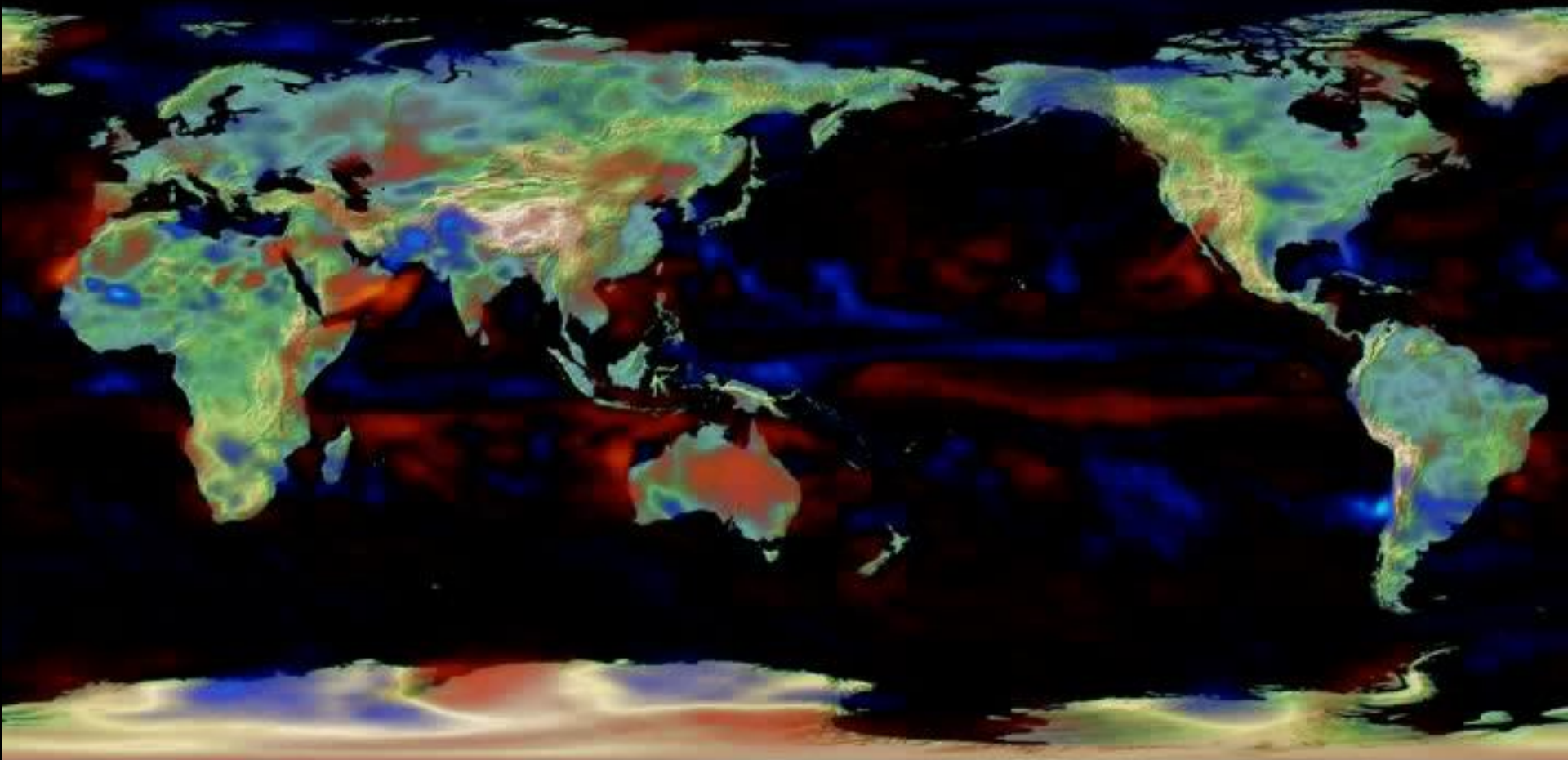
+12 °C

2m temperature change

MIROC5 / RCP8.5

AORI / NIES / JAMSTEC

# 20~21世紀の降水量変化シミュレーション



1950

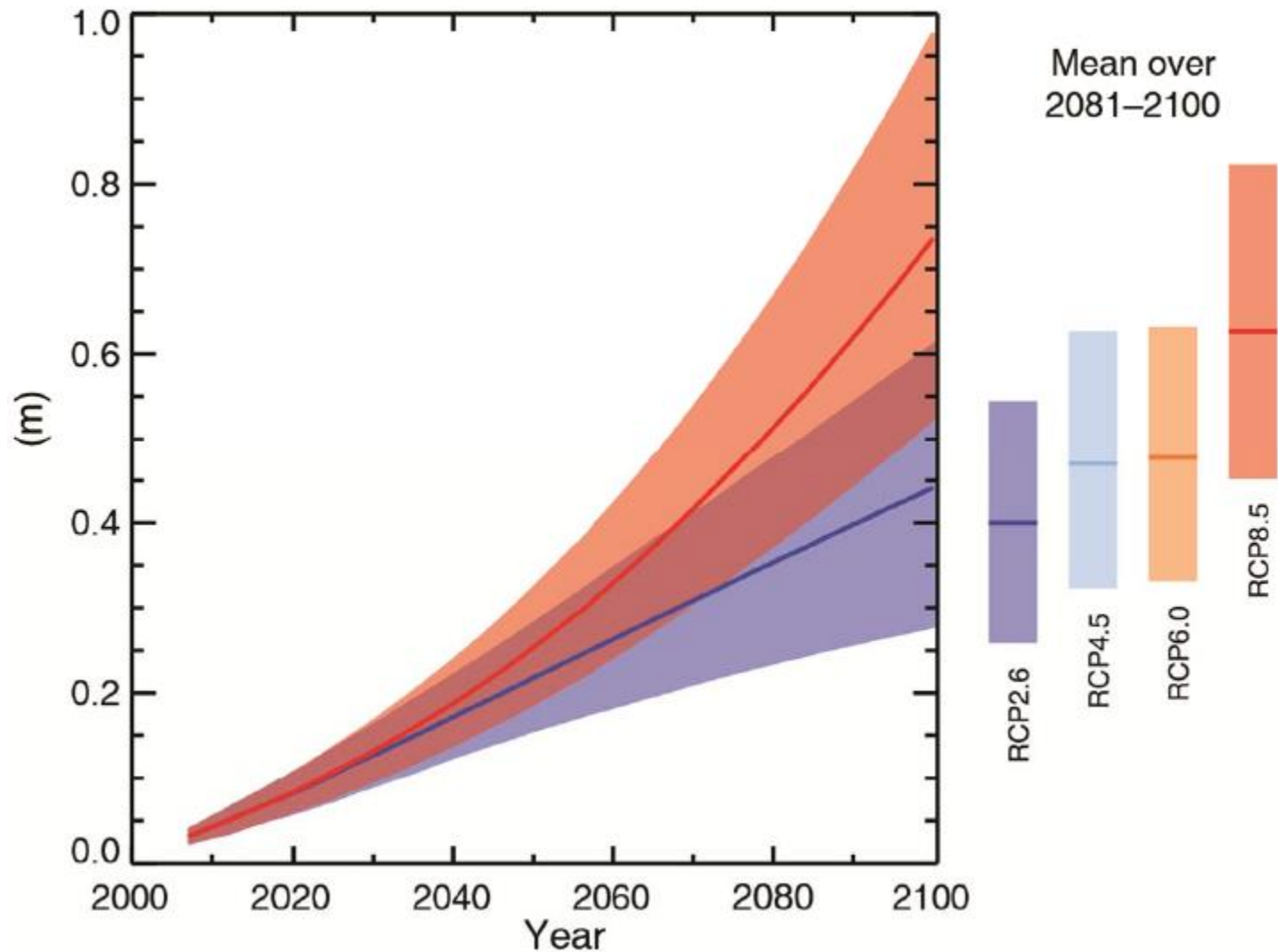


Precipitation change (% relative to the Control)

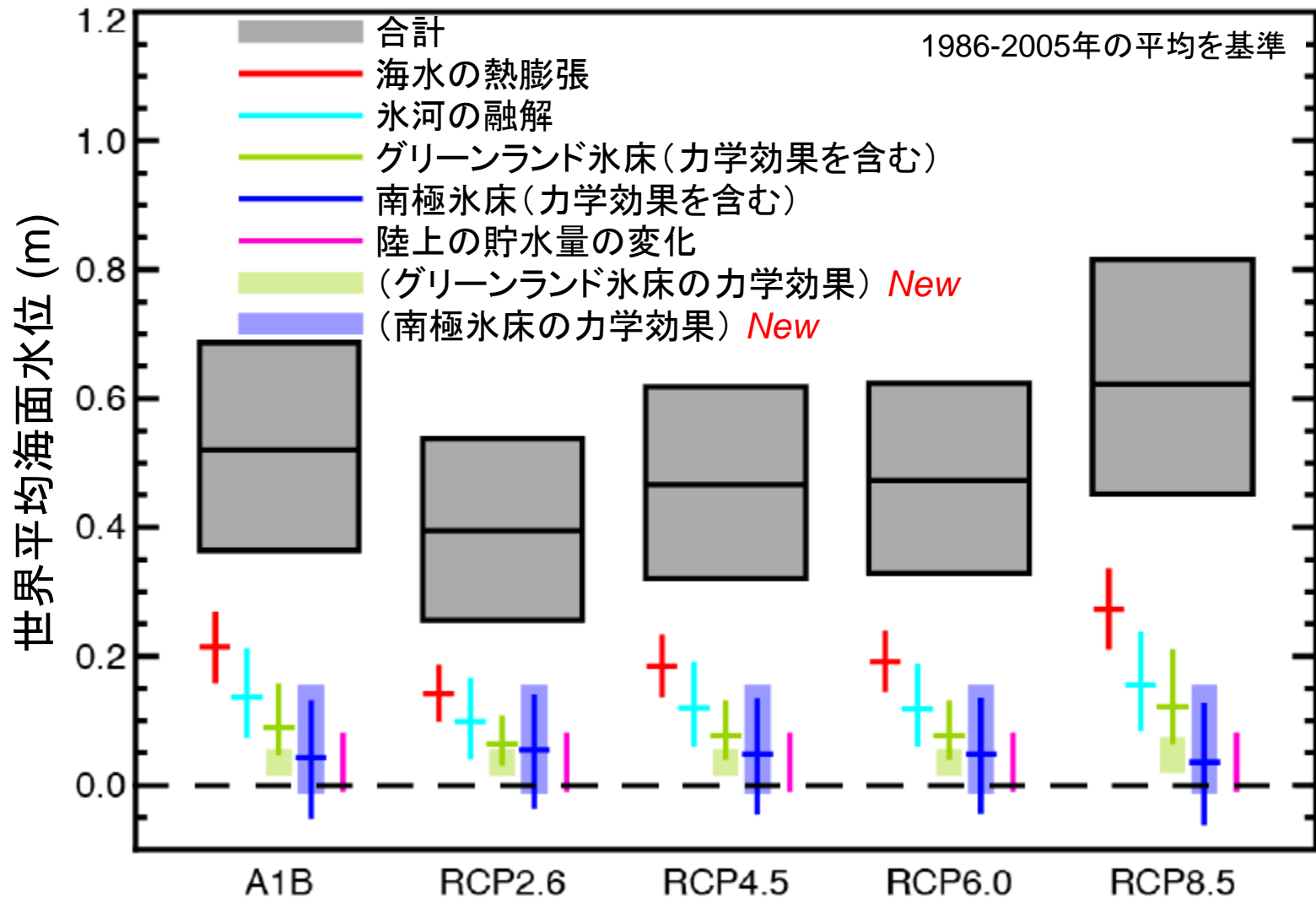
MIROC5 / RCP8.5

AORI / NIES / JAMSTEC

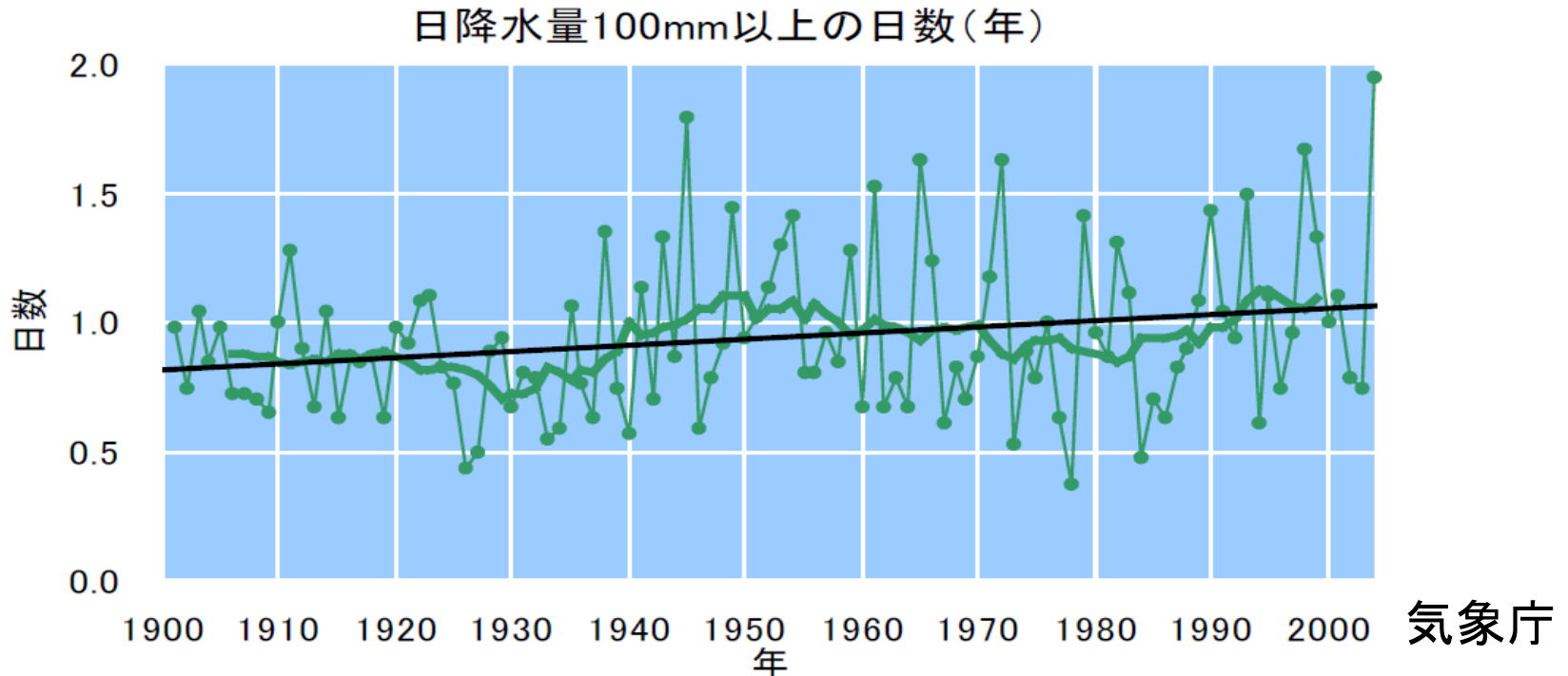
# 予測される100年後の海面水位上昇は？



# 予測される海面水位上昇の内訳



# 異常気象が増えている？



個々のケースが温暖化のせいとはいえない  
高温日、大雨などには増加傾向がみられる  
温暖化が進めばさらに増加

(ただし、高温日の増加には都市化も影響)

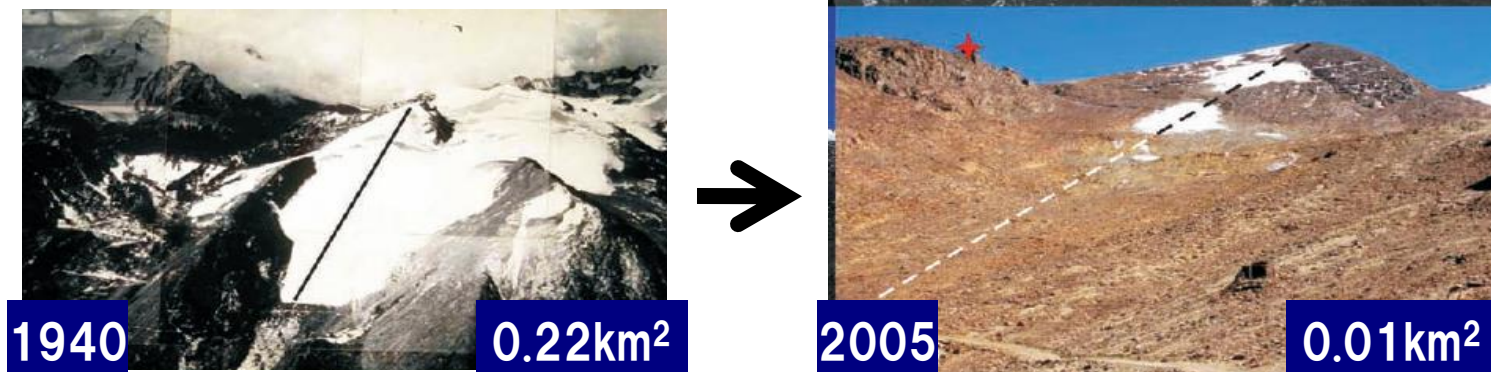
# 極端現象の過去および将来の変化

現象及び傾向	20世紀後半に起きた可能性	人間活動の寄与の可能性	将来の傾向の可能性
寒い日と寒い夜の頻度減少	可能性が非常に高い	可能性が非常に高い	ほぼ確実
暑い日と暑い夜の頻度増加	可能性が非常に高い	可能性が非常に高い	ほぼ確実
熱波の頻度が増加	いくつかの地域で可能性が高い	可能性が高い	可能性が非常に高い
大雨の頻度が増加	増加地域が減少地域より多い可能性が高い	確信度が中程度	中緯度と熱帯湿潤域で可能性が非常に高い
干ばつの影響を受ける地域が増加	いくつかの地域で可能性が高い	確信度が低い	可能性が高い
強い熱帯低気圧の数が増加	確信度が低い	確信度が低い	どちらかといえば
高潮の発生が増加	可能性が高い	可能性が高い	可能性が非常に高い

# 世界中で既に現れている影響

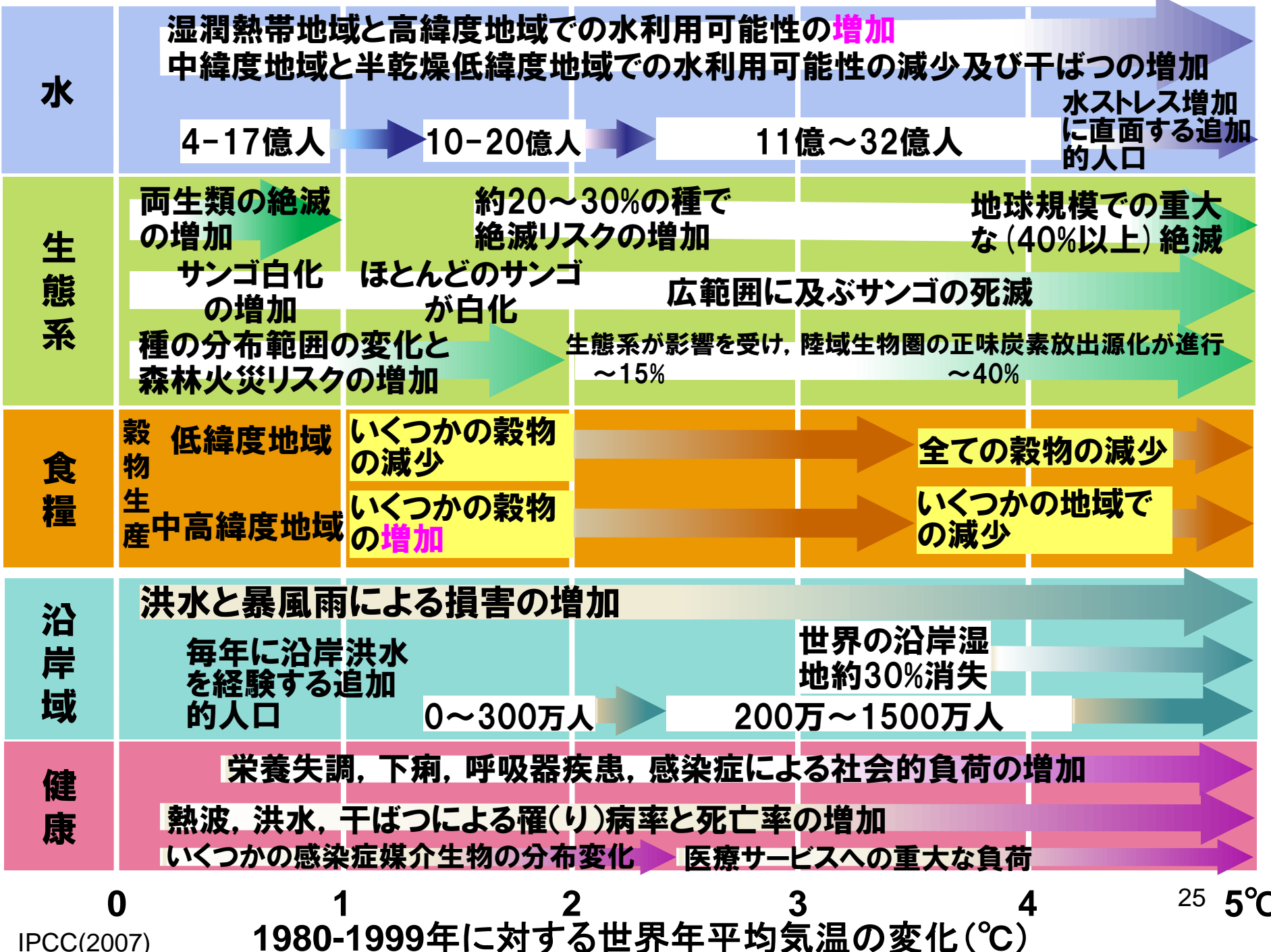
- 氷河・永久凍土の融解、氷河湖の拡大、雪崩増加
- 雪解けの早まりによる河川流量変化
- 開花、鳥の渡り、産卵などの早期化、動植物の移動
- 海洋における藻類、プランクトン、魚類の数の変化
- 農作物の植え付け時期の早期化、... IPCC AR4 WG2

例：南米チャカルタヤ氷河の後退



ただし、因果関係の単純化に注意(例：ツバルの浸水)<sup>24</sup>





0 1 2 3 4 25 5°C  
IPCC(2007) 1980-1999年に対する世界年平均気温の変化(°C)

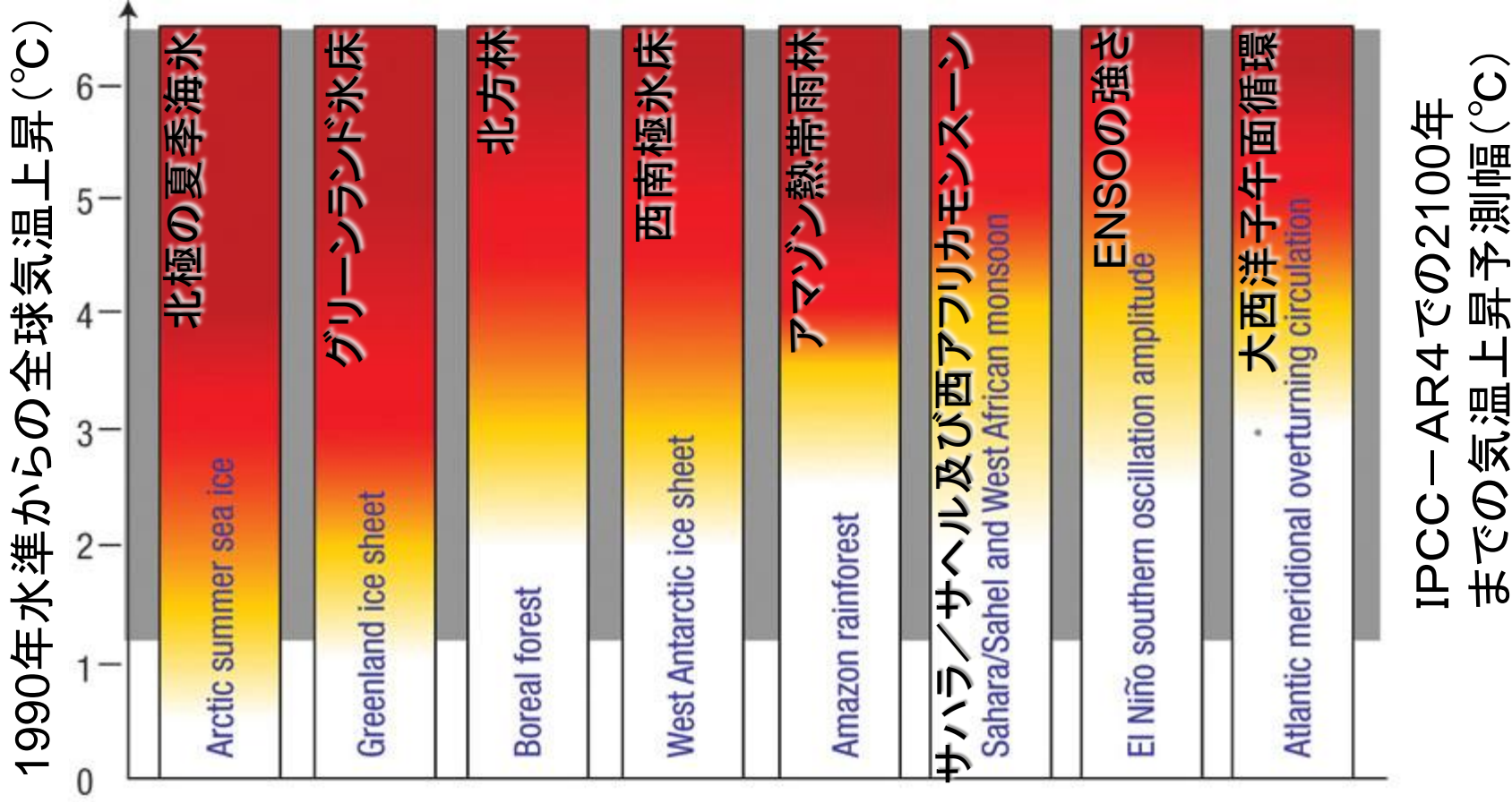
# 温暖化は怖くない？

- 良い影響もある
  - 寒い地域での農業生産性の増加
  - 健康への寒冷ストレスの減少
  - 降水量が増える地域で水資源の増加
- 何でも温暖化のせいじゃない
  - 人口増加
  - 都市化
- 適応すれば何とかなる？
  - 農業の栽培品目、作付時期等の変更
  - 冷房の導入

# 温暖化はすごく怖い？

- 他国の被害を通じて日本も影響を受ける
  - 輸入農作物の高騰
  - 環境難民
  - 国際紛争の増加
- 地球システムの大規模な変化を引き起こす
  - グリーンランド氷床の融解(1~4°C?)
  - 西南極氷床の不安定化(2~5°C?)
  - アマゾン熱帯雨林の消失(2.5~4.5°C?)
  - 大西洋海洋深層循環の停止(3~5°C?)
  - ...

# 地球システムの大規模かつ非連続的な変化の可能性(tipping elements)

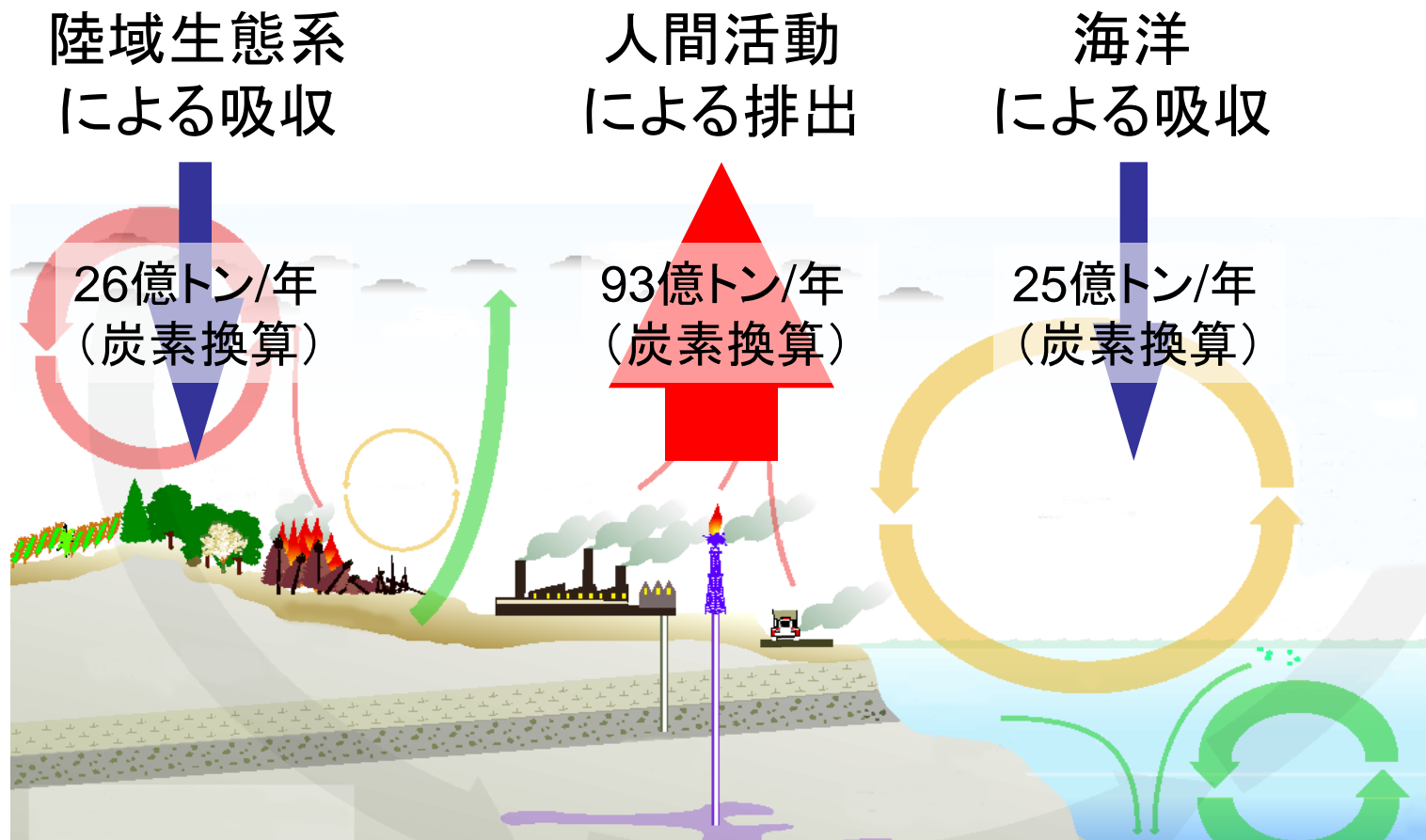


# 価値判断による？

- 日本に影響が及ばない他国の被害
  - 特に、自然災害に脆弱な途上国で大被害の恐れ
- 将来世代への影響
  - 子や孫の代
  - さらに先の人類文明
- 自然生態系への影響
  - 野生生物種の絶滅
  - 景観などの価値

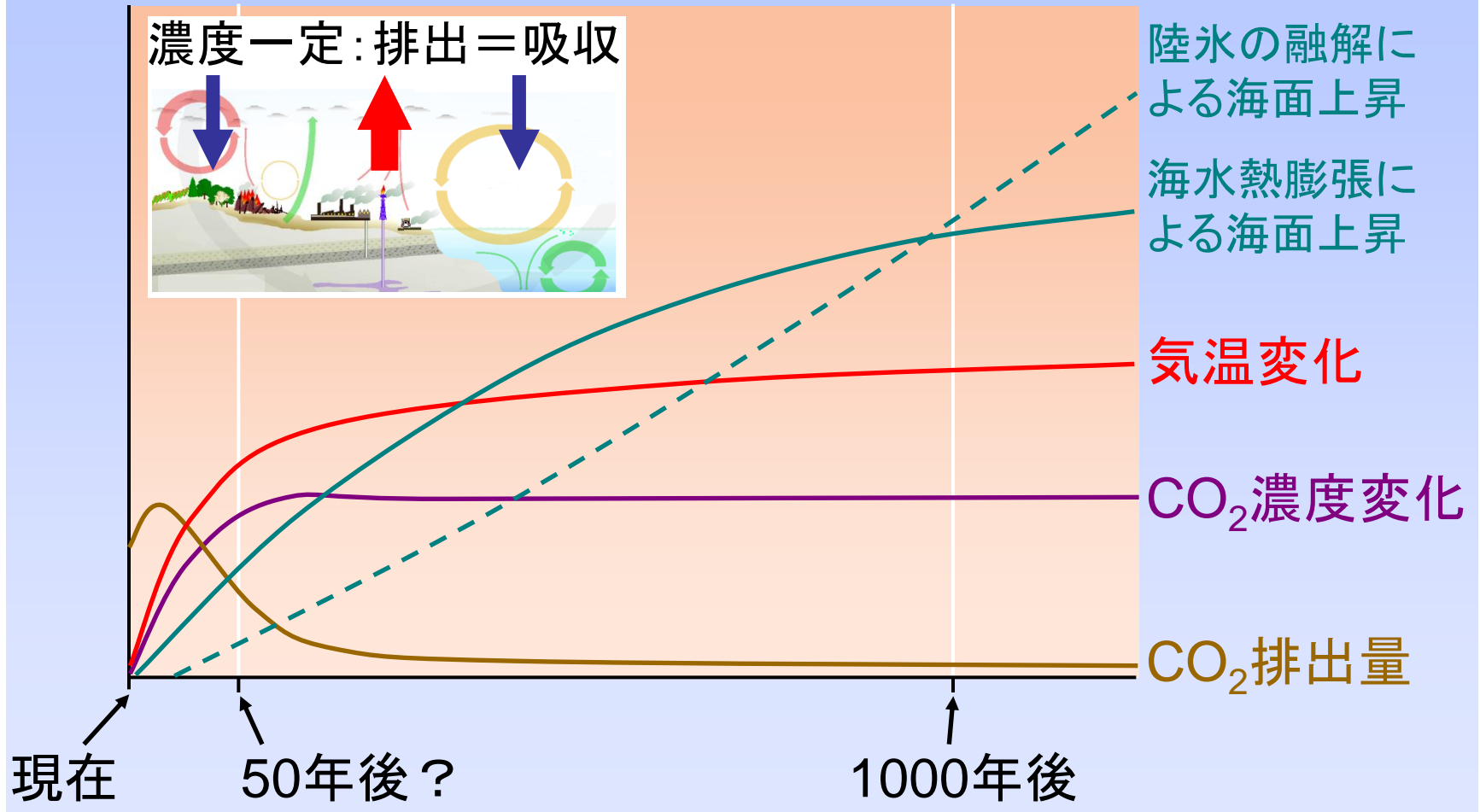
# 排出された二酸化炭素のどれだけが 大気中にのこるか？

地球の炭素循環：大気残存量＝排出量－吸収量



# どれくらい排出量を減らせばよいか？

応答の大きさ



# 温暖化対策効果と科学的不確実性

温室効果ガス  
排出量

↓ 気候-炭素循環フィードバックの不確実性

(自然がどれくらい吸収してくれるかわからない)

温室効果ガス  
大気中濃度

↓ 気候感度・海洋熱吸収の不確実性

(地球の温度がどれくらい上がりやすいかわからない)

気温上昇量

↓ 海面上昇・極端現象等の不確実性

(災害等がどのくらい増えるかわからない)

社会への影響

未知のプロセス／「サプライズ」の可能性<sub>32</sub>?



# 世界で宣言されはじめていること(1)

## 2009年ラクイラG8サミット首脳宣言

- 我々は、産業化以前の水準からの世界全体の平均気温の上昇が**摂氏2度を超えないようにすべき**との広範な**科学的見解**を認識する。
- この世界的な課題は世界全体の対応によってのみ対応可能であることから、我々は、**2050年までに世界全体の排出量の少なくとも50%の削減**を達成するとの目標を全ての国と共有することを改めて表明する。

# 世界で宣言されはじめてのこと(2)

## 2009年COP15・コペンハーゲン合意

- 気候系に対して危険な人為的干渉を及ぼすこととならない水準において大気中の温室効果ガスの濃度を安定化させるという条約の究極的な目的を達成するため、我々は、世界全体の気温の上昇が**摂氏2度より下にとどまるべきであるとの科学的見解**を認識し、衡平の原則に基づき、かつ、持続可能な開発の文脈において、気候変動に対処するための長期的協力の行動を強化する。

# 「2°C」目標の経緯

## 気候変動枠組条約第2条(究極目的)

- 気候系に対して危険な人為的干渉を及ぼすこととならない水準において大気中の温室効果ガスの濃度を安定化させる(具体的数値無し)

## 1996年6月の欧州環境理事会

- 安定化の目標として気温上昇が産業化前比2°C以下、大気中CO<sub>2</sub>濃度が550ppmを提案  
(→大気中CO<sub>2</sub>濃度550ppm以下の目標は途中消滅)

## 2009年のラクイラG8サミット&MEF

- 地球の気温上昇を産業化前比2°C未満に抑えるべきとの科学的見解を首脳宣言で認識

# 気温上昇と影響の関係 (IPCC)

1990年～2000年水準を基準にして、地球全体の平均気温が

0°C～2°C上昇 (産業化前を基準に0.5～2.5°C)

- すでに観測されている影響を一層悪化
- 多くの低緯度諸国における食料安全保障の低下
- 地球規模の農業生産性など、一部のシステムには便益

2°C～4°C上昇 (産業化前を基準に2.5～4.5°C)

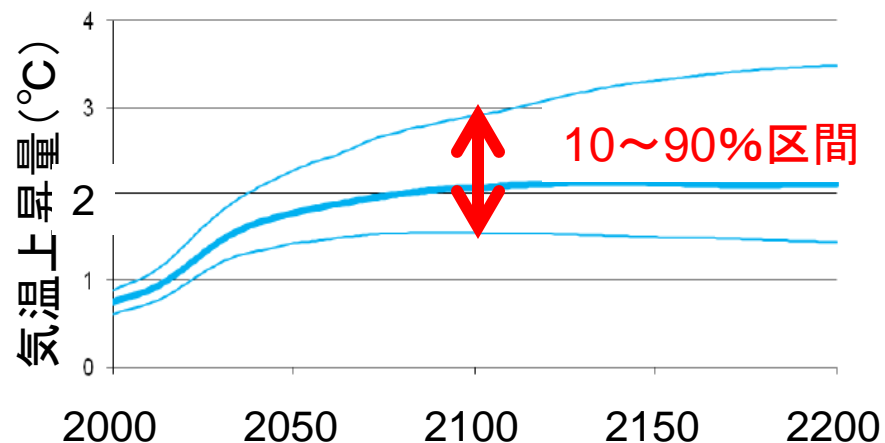
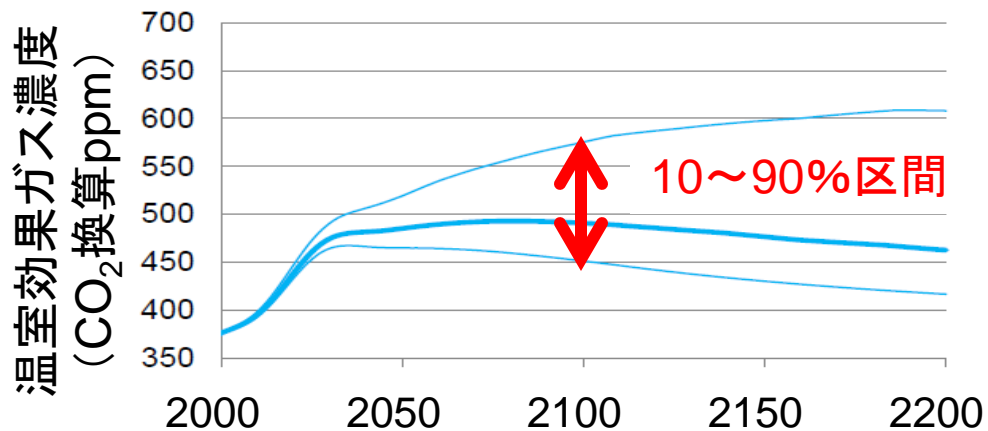
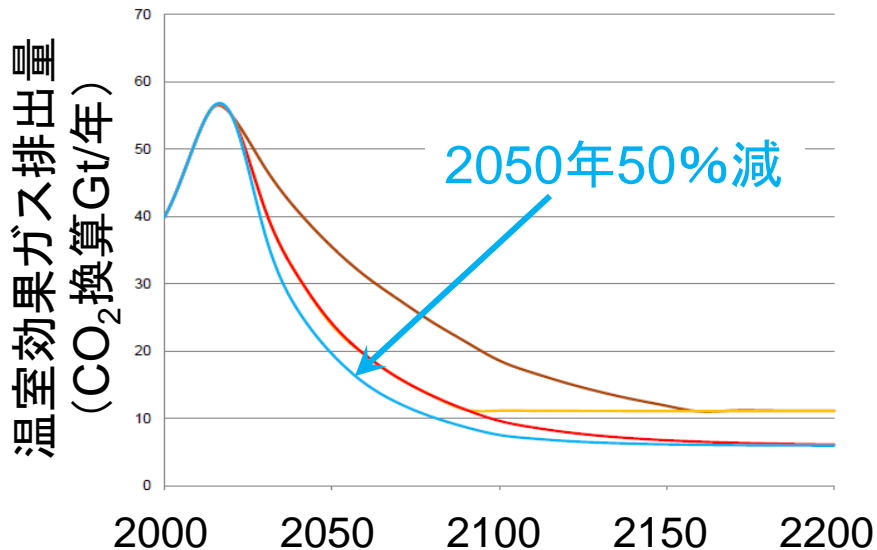
- 主要な影響の数があらゆる規模で増加
- 生物多様性の広範な喪失、地球規模での農業生産性の低下、グリーンランドと西南極の氷床の広範な後退など

4°C超上昇 (産業化前を基準に4.5°C超)

- 脆弱性の大幅な増大
- 多くのシステムの適応能力を超える

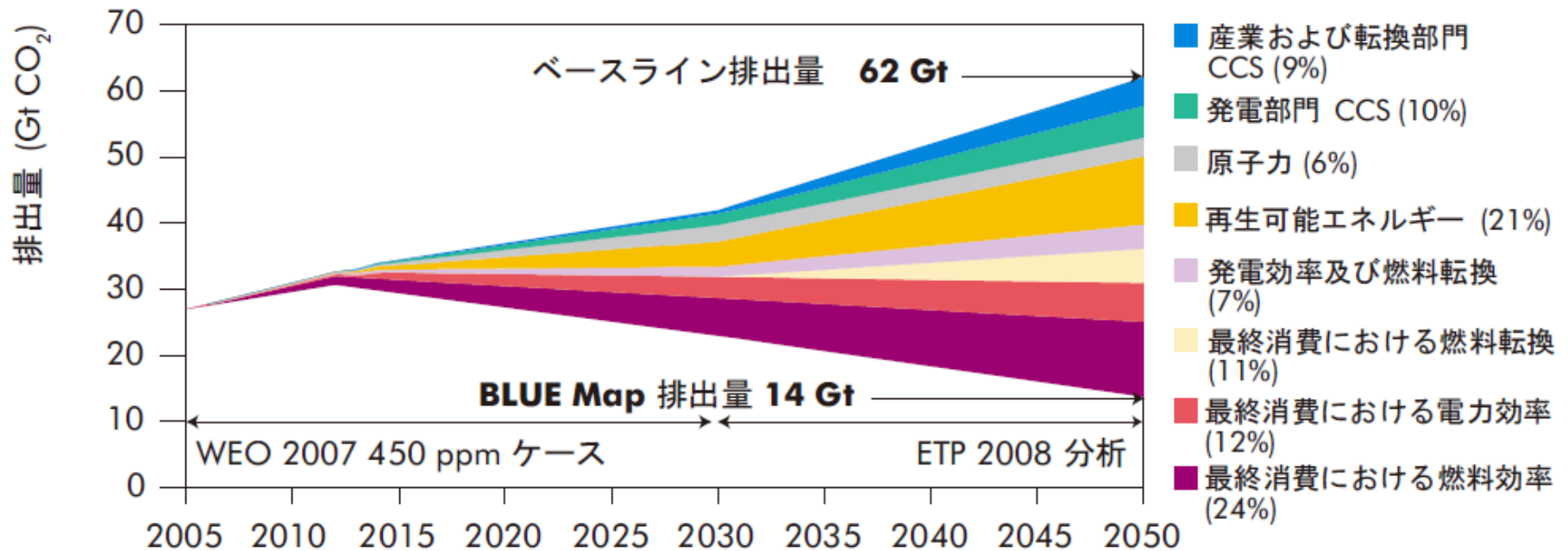
# 削減量-濃度-気温関係の不確実性

英国気候変動委員会(2008)



2050年50%削減  
→「50%の確率で」  
2°Cを超えない

# 2050年に50%排出削減するには？



技術導入シナリオの一例（国際エネルギー機関, 2008）

様々な技術を大量に導入する必要がある  
供給側・需要側両方の技術が重要

# 地球温暖化対策の幅広い考え方

- 緩和(必須)
  - 温室効果ガスの排出削減により、温室効果の増加を抑制する
- 適応(必須)
  - 温暖化した気候に適したように社会を変化させ、悪影響を和らげる(または好影響を引き出す)
- ジオ・エンジニアリング(最後の手段?)
  - 地球規模の工学的方法を用いて、温室効果ガスを排出しても温暖化が起こらないようにする  
(地球の反射率を上げる/CO<sub>2</sub>を吸収する)

# まとめ

- 温室効果ガスの増加により温暖化が起こることは理論的に確か。既に起こっている可能性も非常に高い。
- 将来予測には幅があるが、気温上昇、海面上昇、降水分布の変化などが予測されている。
- 温暖化の様々な影響が予測されているが、危機感の認識には価値判断を含む。
- 温暖化を止めるには、いずれは世界の温室効果ガス排出量を大幅に削減する必要がある。



「わたしたち」には何ができるか

# 心技体

- 心・・・価値観、ライフスタイル
- 技・・・省エネ技術、自然エネ技術
- 体・・・社会システム(体系)＝制度、インフラ

# 「誰が考えても避けるべき」悪影響はあるか？

## ‘Tipping Elements’

ある温度を超えると引き起こされる地球システムの質的な変化

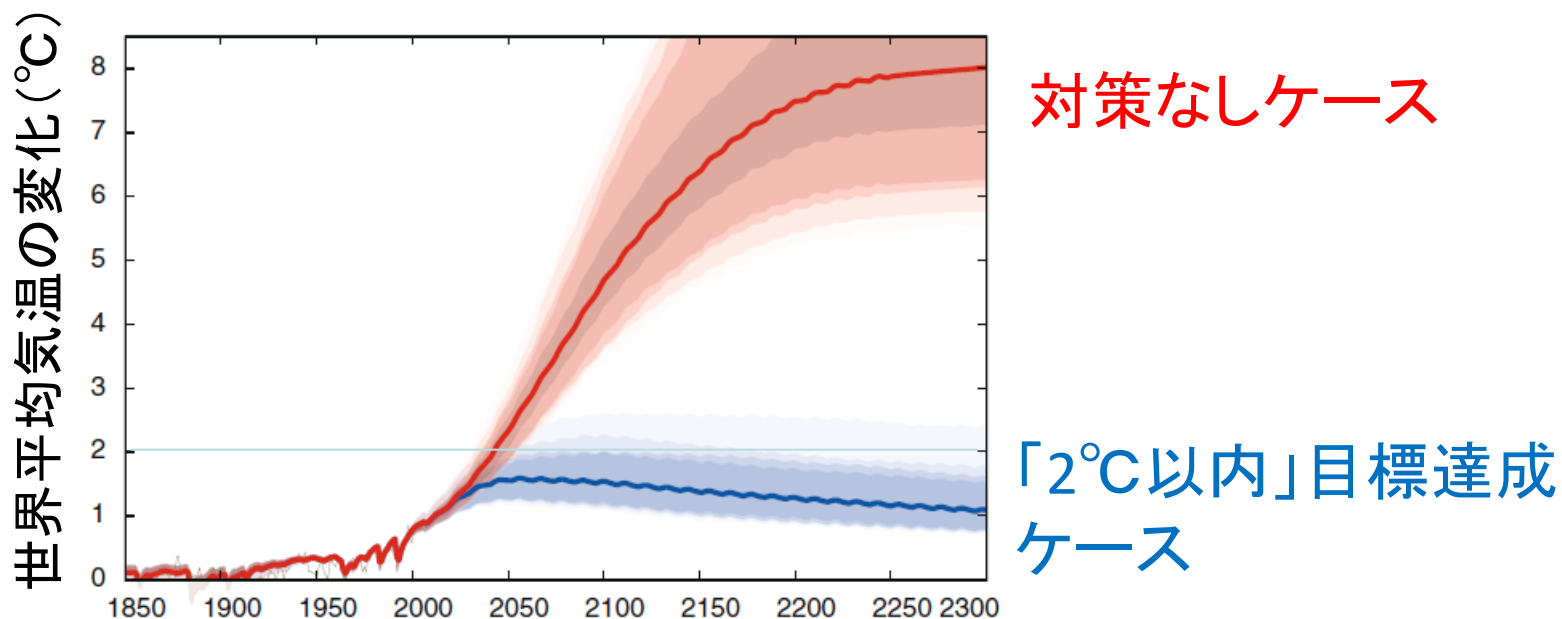
### 例：グリーンランド氷床融解の不安定化

- 「2°C」程度でトリガーされる可能性があるが、不確実性が大きい。
- すべて融けると海面が7m上昇するが、数100年～数1000年かかる。
- 現在世代にとって致命的ではないかもしれないし、将来も適応できないと決まったわけではない。
- 一方で、そのような地球の異変を人類が引き起こすこと自体が許されないという価値判断もある。

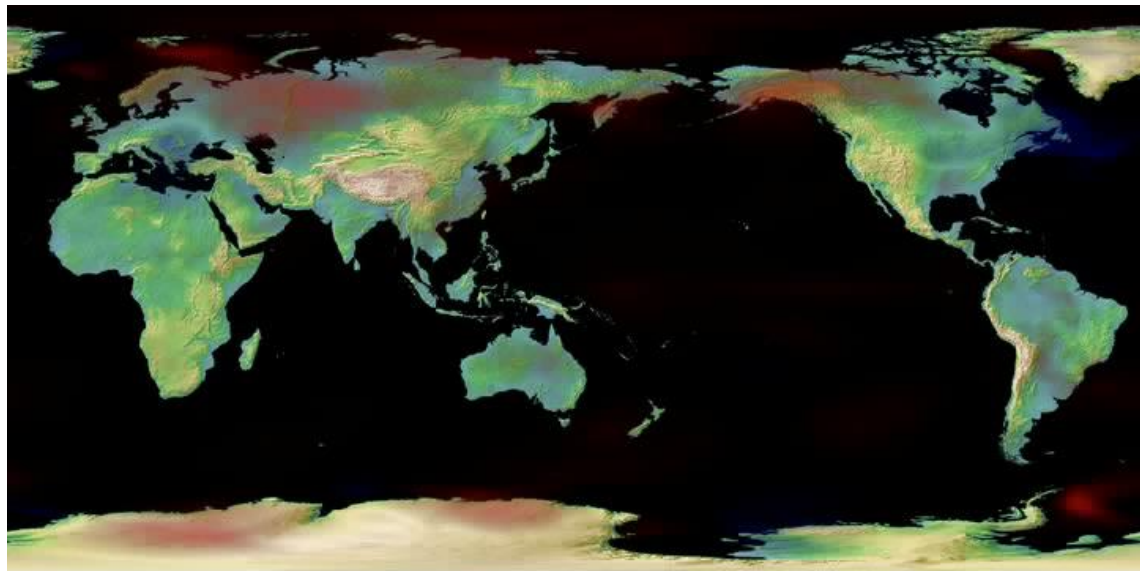
# 気候変動対策の長期目標

「産業化以前からの世界平均気温の上昇を $2^{\circ}\text{C}$ 以内に収める観点から温室効果ガス排出量の大幅削減の必要性を認識する」

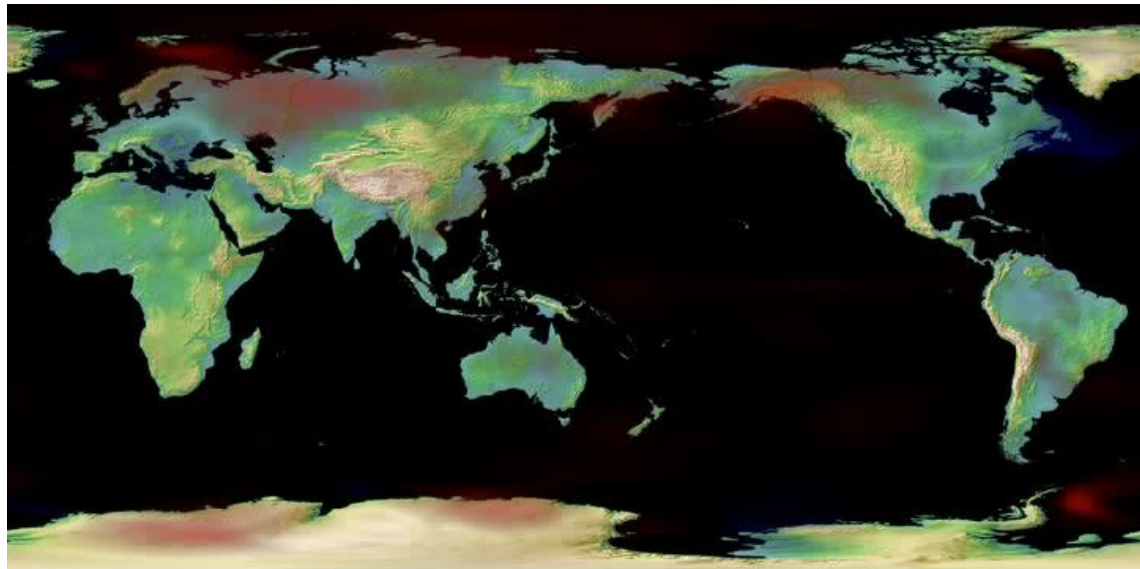
気候変動枠組条約 COP16 カンクン合意(2010年)



Meinshausen et al. (2011) より



1950



1950



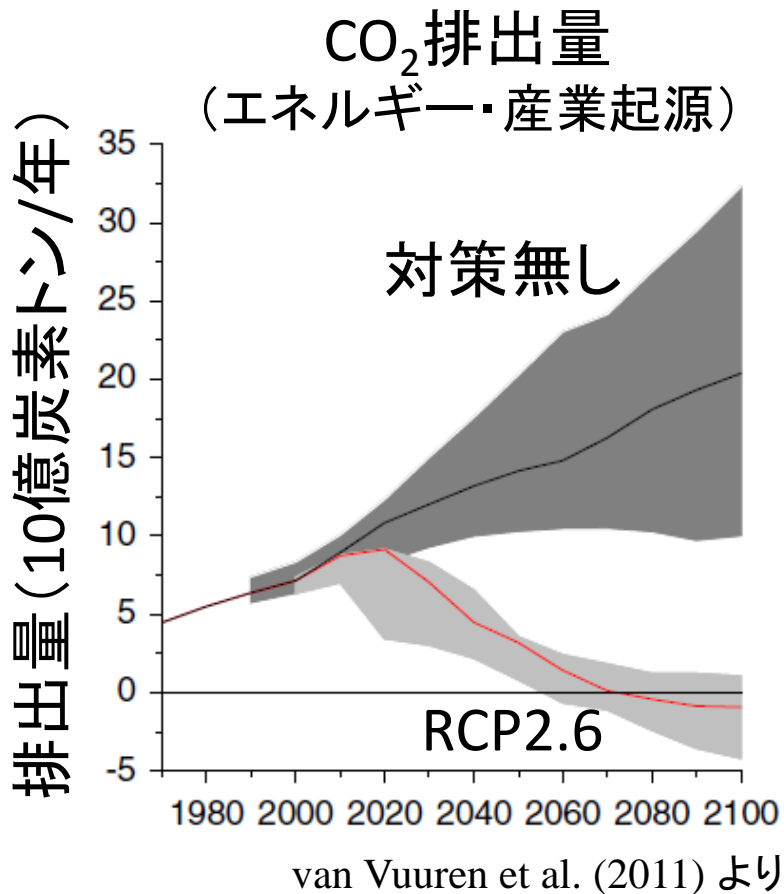
# 気温変化 シミュレーション

MIROC5気候モデルによる  
(AORI/NIES/JAMSTEC/MEXT)

## 対策無しケース

## 「2°C以内」ケース

# 「2°C以内」目標を達成する排出削減経路



## 今世紀前半

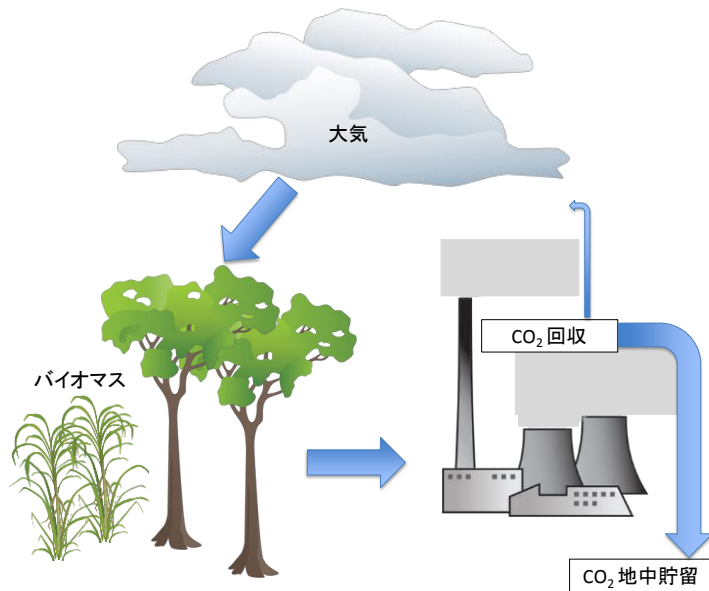
世界全体の排出量を現状に比べて2050年までに半減程度

## 今世紀後半

世界全体の排出量はゼロに近いが、マイナス

(「バイオマスCCS」等によりCO<sub>2</sub>を大気から吸収して地中に貯留)

# 「切り札」バイオマスCCSは使えるか？



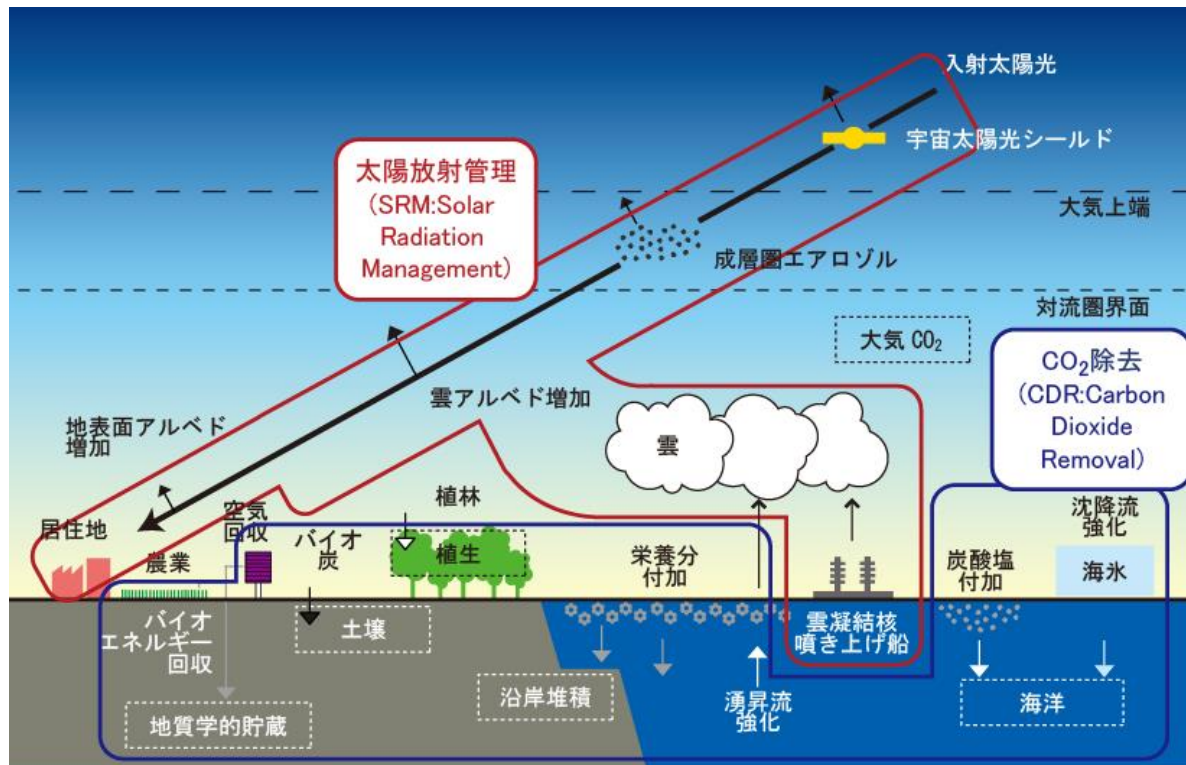
正味の人為排出量をゼロに  
近くするため、CO<sub>2</sub>を大気から  
吸収する技術が必要。

→バイオマスCCS

(CCS＝炭素回収貯留)

- 燃料作物の大規模栽培は土地をめぐるって食料生産と競合する。
- 新たな土地の開発は炭素放出を伴うとともに、生態系破壊にもつながる。
- そもそもCCS自体の社会的受容性が未知数。

# 最終手段は「気候工学」か？



出典: 杉山, 気候工学入門, 日刊工業新聞社, 2011

- 成層圏エアロゾルを散布するSRMは低コスト。
- 気温分布、降水分布などに副作用の可能性。
- 終端効果 (SRMを止めたときの急激な温暖化)。

- 太陽放射管理 (SRM)
- CO<sub>2</sub>除去 (CDR)

# 気候変動関連リスクを「全体像」で捉える

## 気候変動の悪影響

- 熱波、大雨、干ばつ、海面上昇
- 水資源、食料、健康、生態系への悪影響
- 難民・紛争増加？
- 地球規模の異変？
- ...

## 気候変動の好影響

- 寒冷地の温暖化による健康や農業への好影響
- 北極海航路
- ...

## 対策の悪影響

- 経済的コスト
- 対策技術の持つリスク(原発など)
- バイオマス燃料と食料生産の競合
- 急激な社会構造変革に伴うリスク
- ...

## 対策の好影響

- 気候変動の抑制、悪影響の抑制
- 省エネ
- エネルギー自給率向上
- 大気汚染の抑制
- 環境ビジネス
- ...

悪影響、好影響の出方は、国、地域、世代(現在⇔将来)、社会的属性(年齢、職種、所得等)によって異なる。



# まとめ(ポスト3.11バージョン)

- 温室効果ガスの増加により温暖化が起こることは理論的に確か。既に起こっている可能性も非常に高い。
- 将来予測には幅があるが、気温上昇、海面上昇、降水分布の変化などが予測されている。
- 温暖化の様々な影響が予測されているが、危機感の認識には価値判断を含む。
- 温暖化を放置しても、急激に対策しても、リスクがある。人類はリスク選択の大きな判断を迫られている。

## 2. 気候モデルとその信頼性

# 地球温暖化の予測は

## 「正しい」か？

不確かな未来に科学が挑む

江守正多 著



DOJIN SENSHO

「第一人者が全てを注ぎ込んだ地球の「これから」の予測。温暖化に関心がある人にとっての必読書が誕生した。」  
茂木健一郎氏推薦

# 将来をどうやって予測するか

将来の世界の社会経済発展



温室効果ガス等の排出量



温室効果ガス等の大気中濃度



気候の変化



人間社会・生態系への影響



# 気候モデルの「予報変数」 (時間積分する変数)

**大気:** 水平風、気温、地表気圧、水蒸気量、  
雲水量

**陸面:** 土壌温度、土壌水、土壌氷、積雪量、  
積雪温度、植生キャノピー水分

**海洋:** 水平流速、温度、塩分、海面高度

**海水:** 海水面積、海水厚、海水流速

**河川:** 河道水分量

# 気候モデルの「境界条件」

- 太陽定数、地球平均半径、地球軌道要素
- 海陸分布、陸上・海底の地形
- 大気組成( $H_2O$ など予報するものを除く)
- 乾燥大気全質量、大気＋海洋＋陸面＋河川の全水分量(初期値として)
- 地表面諸量(土地被覆、土壌タイプ、裸地面反射率、植生量、格子内標高標準偏差、平均傾斜)

# 大気大循環モデルの構成

運動量保存

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \left( \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial u}{\partial \lambda} + \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial v \cos \varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0$$

$$\frac{du}{dt} - \frac{\tan \varphi}{a} uv - fv = F_\lambda - \frac{1}{\rho a \cos \varphi} \frac{\partial p}{\partial \lambda}$$

質量保存

$$\frac{dv}{dt} + \frac{\tan \varphi}{a} u^2 + fu = F_\varphi - \frac{1}{\rho a} \frac{\partial p}{\partial \varphi}$$

$$0 = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (\text{静力学平衡})$$

$$p = \rho RT$$

状態方程式

運動量  
(静力学平衡, 状態方程式)

質量

水蒸気・オゾン

エネルギー保存

$$c_v \frac{dT}{dt} + p \frac{da}{dt} = Q$$

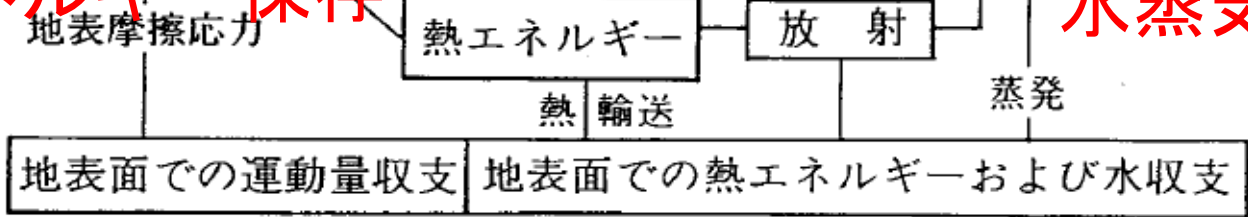
熱エネルギー

雲

放射

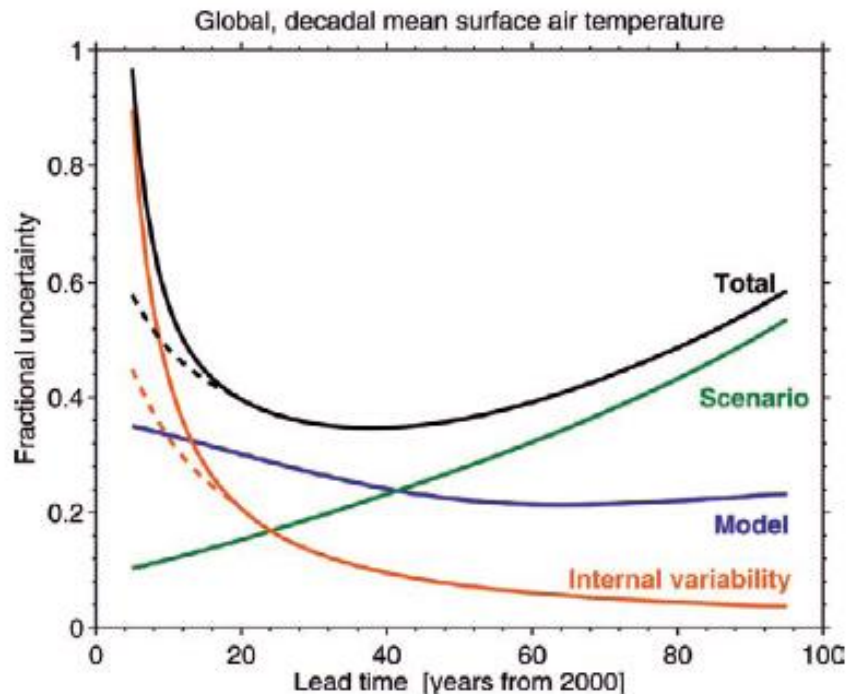
$$\frac{dq}{dt} = -c - \frac{1}{\rho} \frac{\partial F_q}{\partial z}$$

水蒸気保存



# 気候予測の不確実性

1. 内部変動の不確実性(～10年で重要)
2. シナリオの不確実性(100年～で重要)
3. 気候モデルの構造・パラメータの不確実性



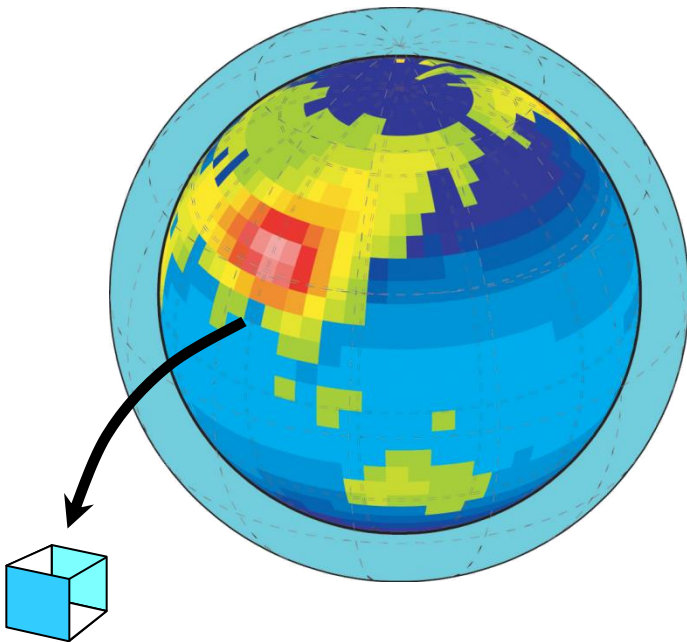
Hawkins and Sutton  
(2009, BAMS)



# 温暖化予測と天気予報はどこが同じでどこが違うか

大気・海洋を3次元の格子  
(数10～数100km)に分割

大気・海洋の変化を支配している  
物理法則の方程式を近似して解く



$$\frac{du}{dt} - \left( f + \frac{u \tan \varphi}{a} \right) v = -\frac{1}{\rho a \cos \varphi} \frac{\partial p}{\partial \lambda} + F_{\lambda}$$

$$c_v \frac{dT}{dt} + p \frac{d\alpha}{dt} = Q$$

...

## 天気予報の場合

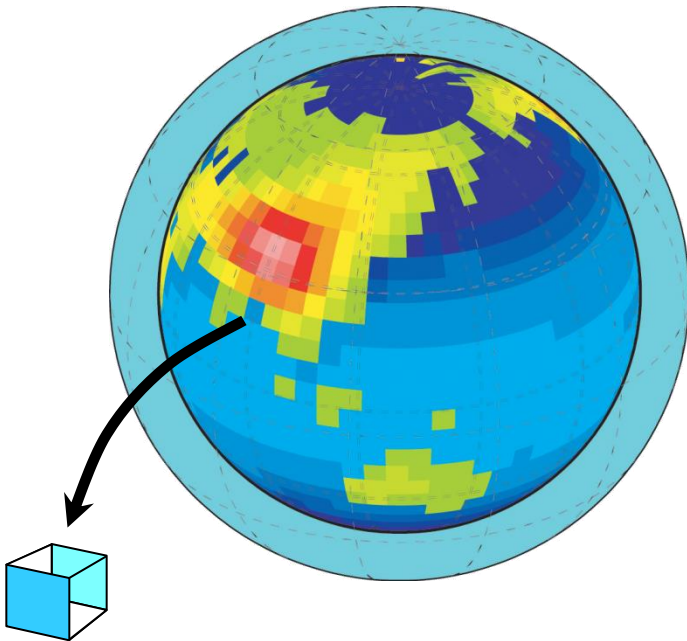
各格子に風，温度  
等の物理量を定義  
**初期条件が重要！**



# 温暖化予測と天気予報はどこが同じでどこが違うか

大気・海洋を3次元の格子  
(数10～数100km)に分割

大気・海洋の変化を支配している  
物理法則の方程式を近似して解く

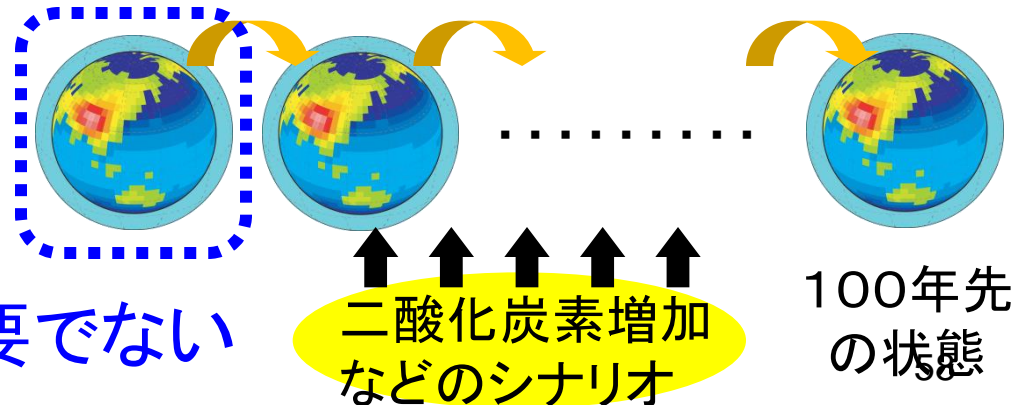


$$\frac{du}{dt} - \left( f + \frac{u \tan \varphi}{a} \right) v = -\frac{1}{\rho a \cos \varphi} \frac{\partial p}{\partial \lambda} + F_{\lambda}$$

$$c_v \frac{dT}{dt} + p \frac{d\alpha}{dt} = Q$$

...

## 温暖化予測の場合



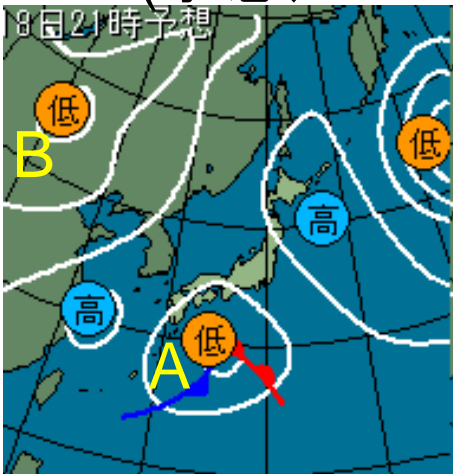
各格子に風, 温度  
等の物理量を定義

初期条件は重要でない

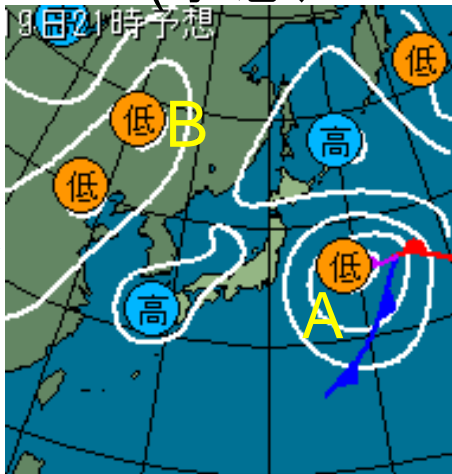
100年先  
の状態

# 日々の天気は「カオス」

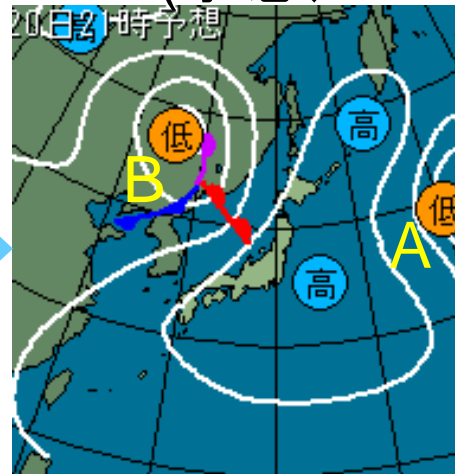
4/18(予想)



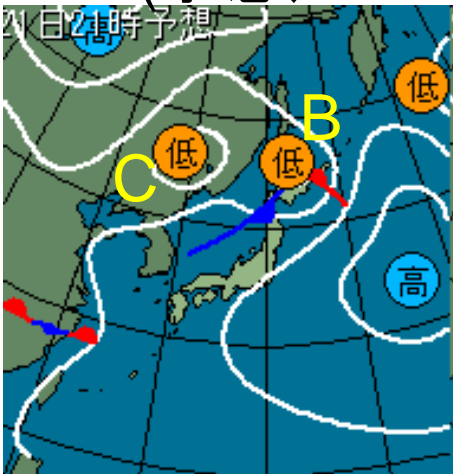
4/19(予想)



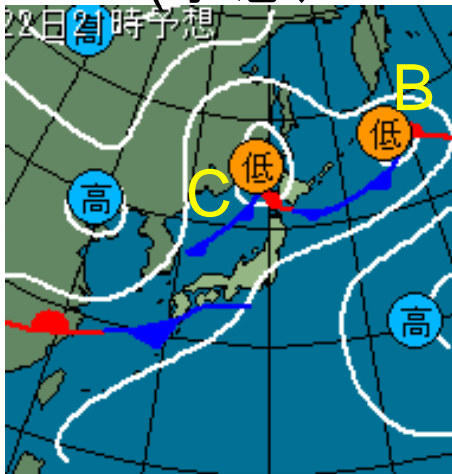
4/20(予想)



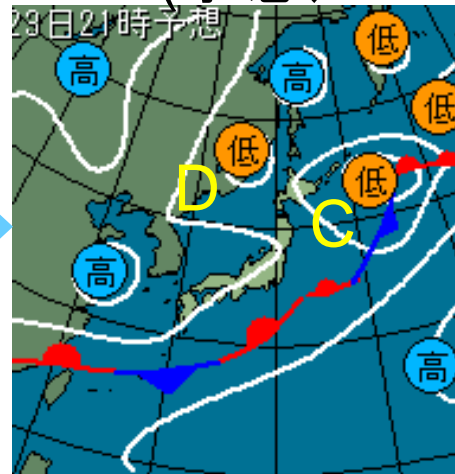
4/21(予想)



4/22(予想)



4/23(予想)



⇒ 1～2週間より先は予測できない

# 「カオス」って？

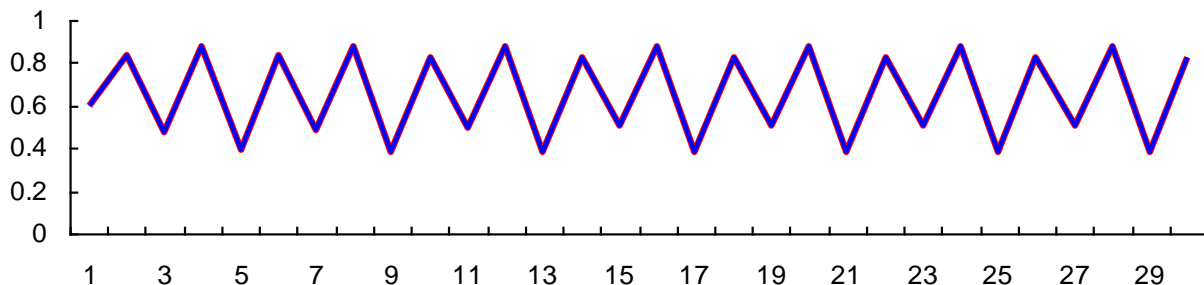
初期値がほんの少しだけ違っても将来の答えがまったく違ってしまふこと

例:  $x_{n+1} = ax_n(1-x_n)$

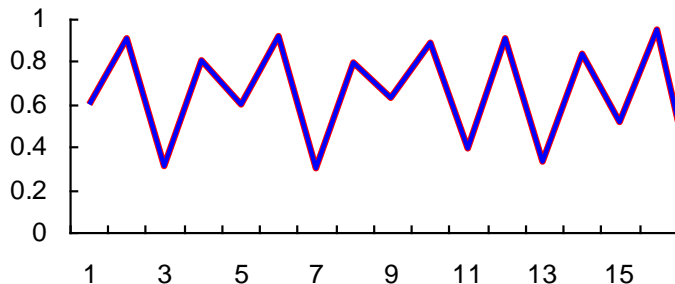
青線: 初期値  $x_1 = 0.600000$

赤線: 初期値  $x_1 = 0.600001$

( $a=3.5$ のとき)  
カオスに  
ならない例

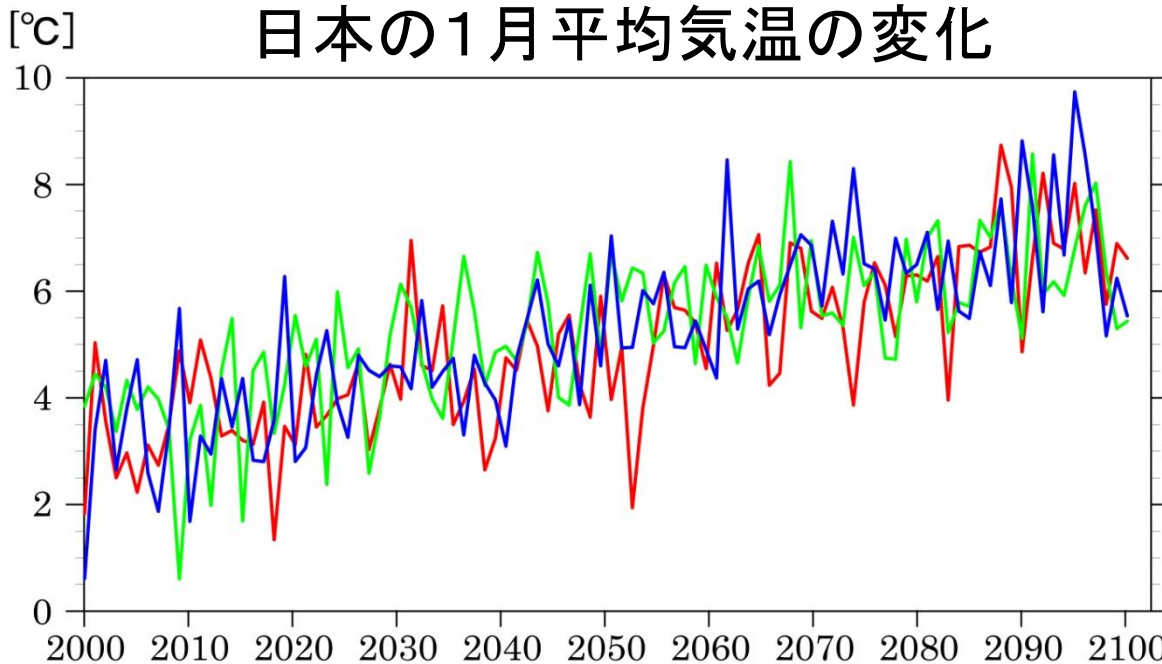


( $a=3.8$ のとき)  
カオスに  
なる例



# 「気候」はあるていど予測可能

初期値の違う3つの予測計算における  
日本の1月平均気温の変化



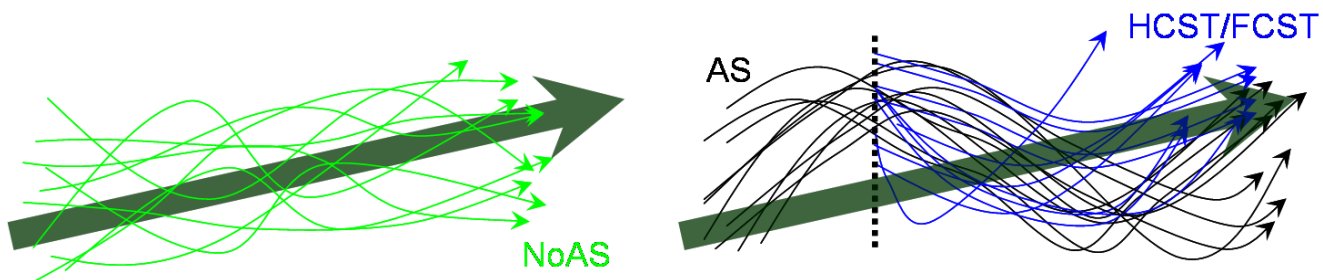
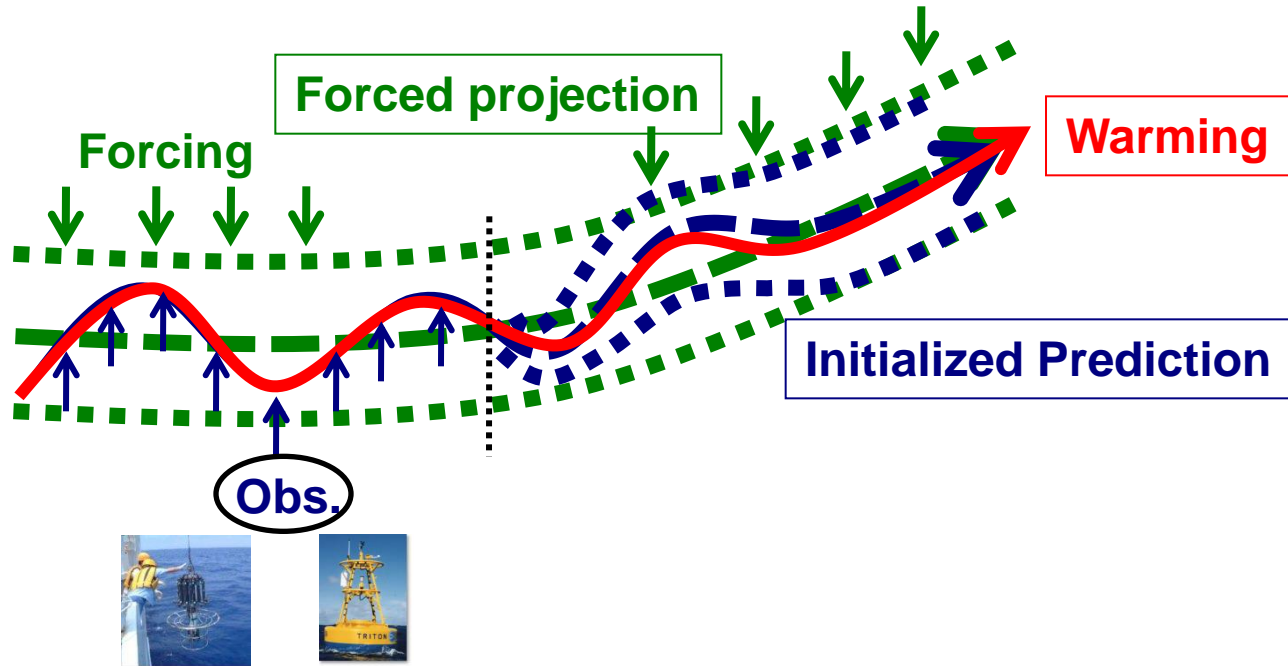
初期値が違っても年々の「ゆらぎ方」は違うが、**平均的な傾向**  
**(例えば100年間の平均上昇率)**はほぼ同じ

地球のエネルギーバランスなどの  
外部条件によってほぼきまる



ただし、将来のシナリオや  
予測モデルの性能による

# 予測の初期値化



# 大気大循環モデルの構成

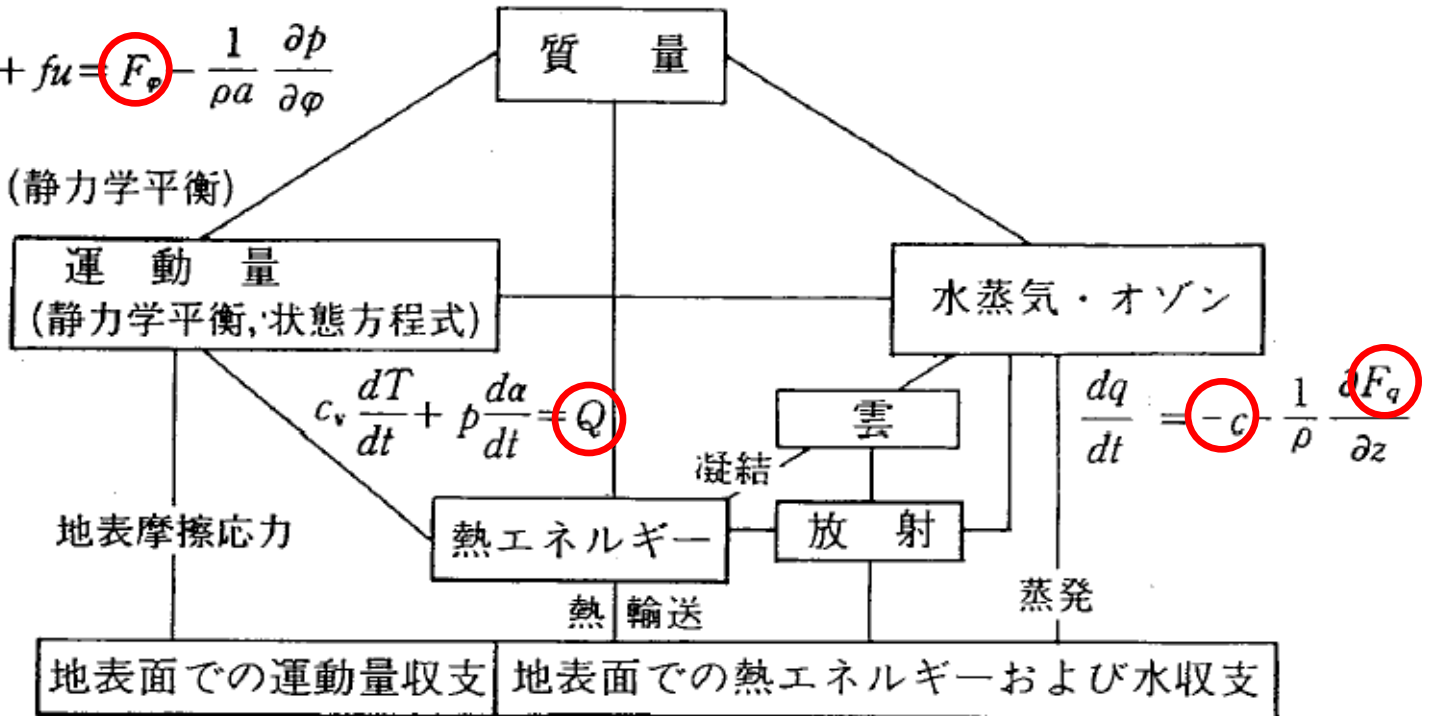
$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \left( \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial u}{\partial \lambda} + \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial v \cos \varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0$$

$$\frac{du}{dt} - \frac{\tan \varphi}{a} uv - fv = F_\lambda - \frac{1}{\rho a \cos \varphi} \frac{\partial p}{\partial \lambda}$$

$$\frac{dv}{dt} + \frac{\tan \varphi}{a} u^2 + fu = F_\varphi - \frac{1}{\rho a} \frac{\partial p}{\partial \varphi}$$

$$0 = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (\text{静力学平衡})$$

$$p = \rho RT$$



# 気候モデル

格子以上のスケール  
の流体现象

格子以下のスケール  
の流体现象  
流体以外の物理現象

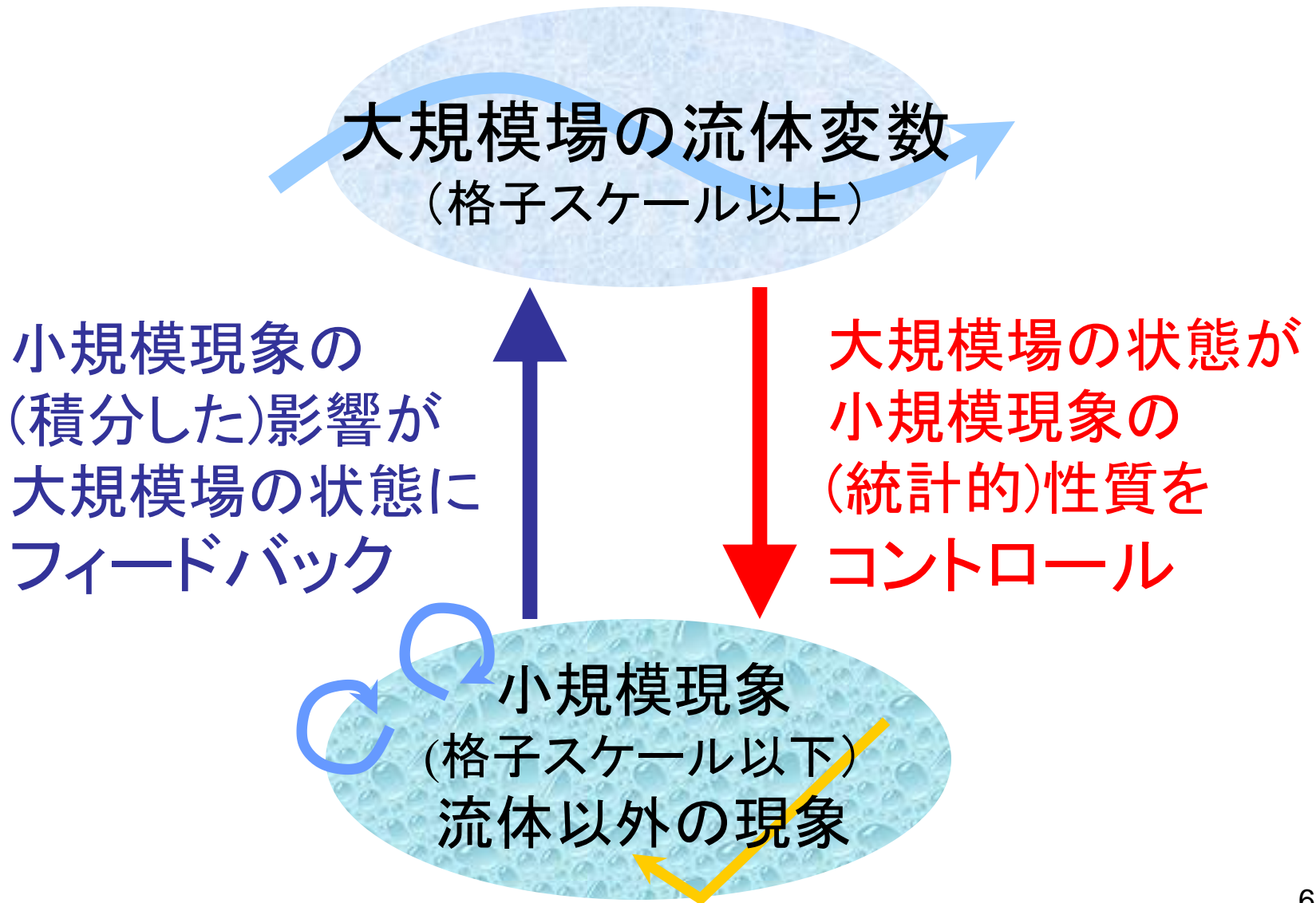
流体の方程式を  
離散化して積分

パラメタ化

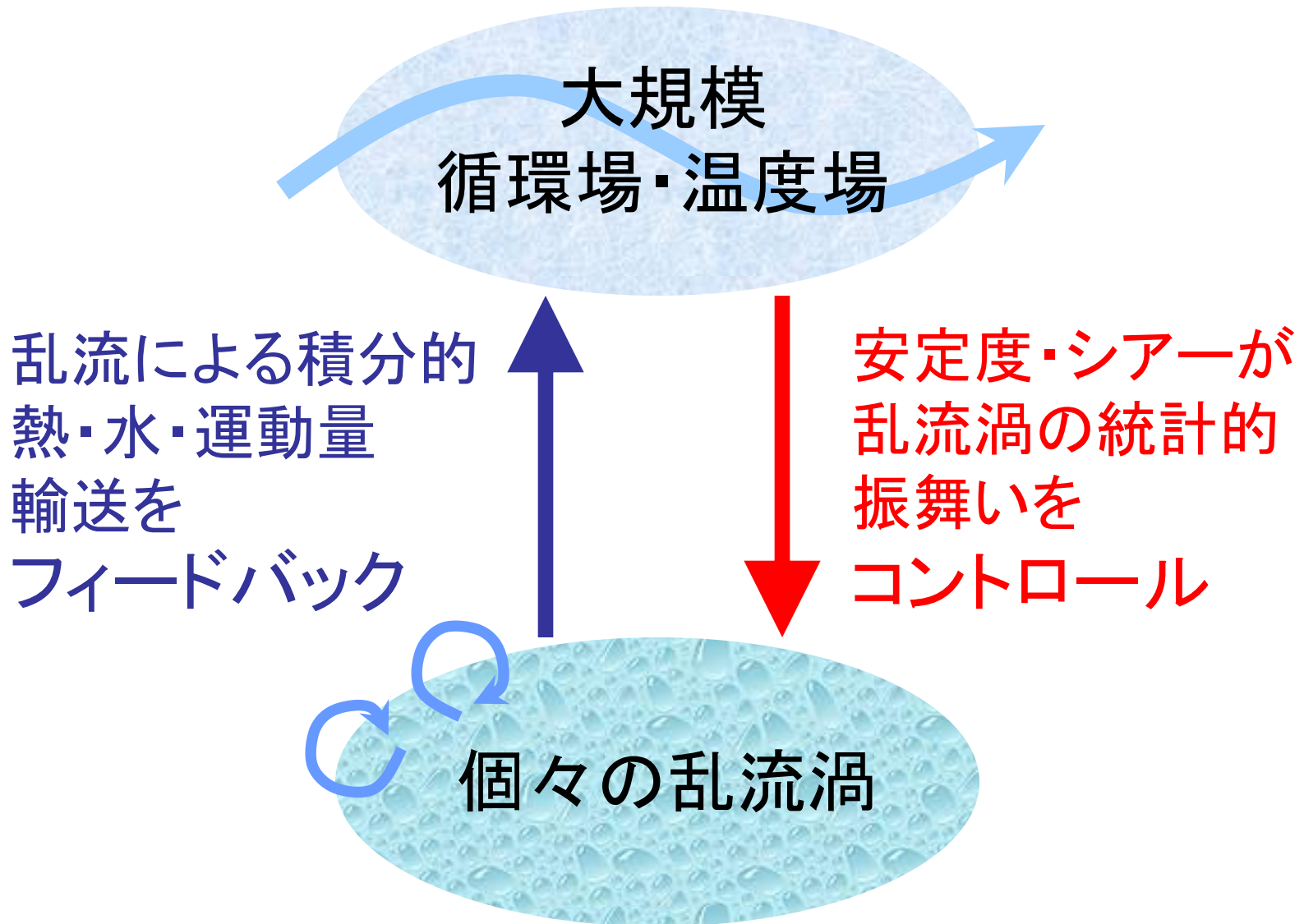
パラメタ化ってそもそもなに？



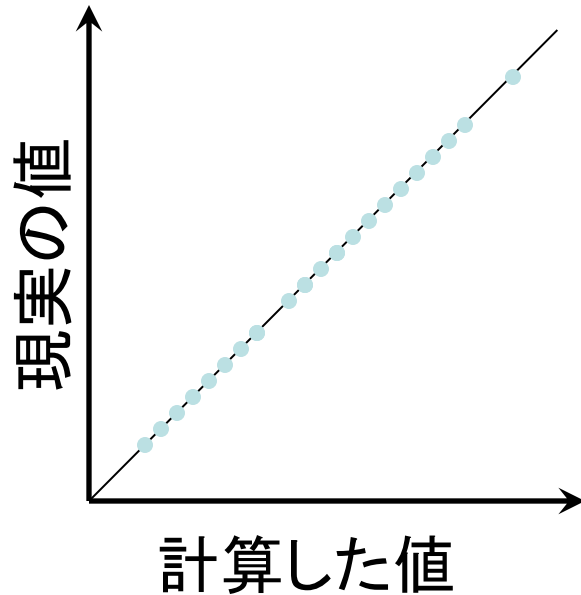
# パラメタ化とは



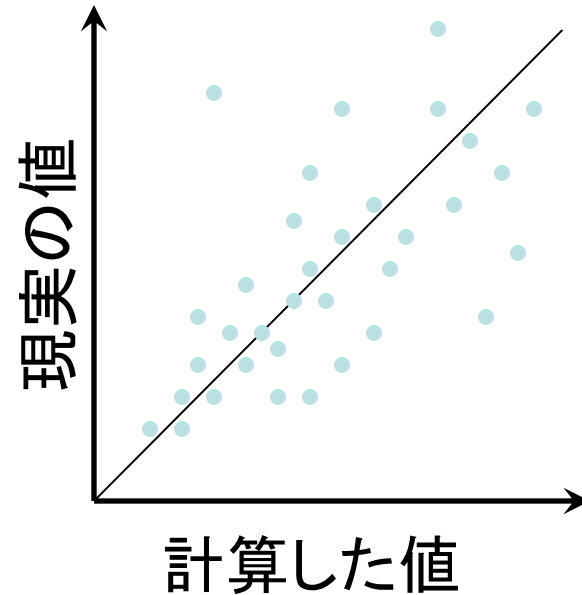
# 境界層パラメタリゼーションの場合



## a. 統計力学の場合



## b. 気候モデルの パラメタ化の場合

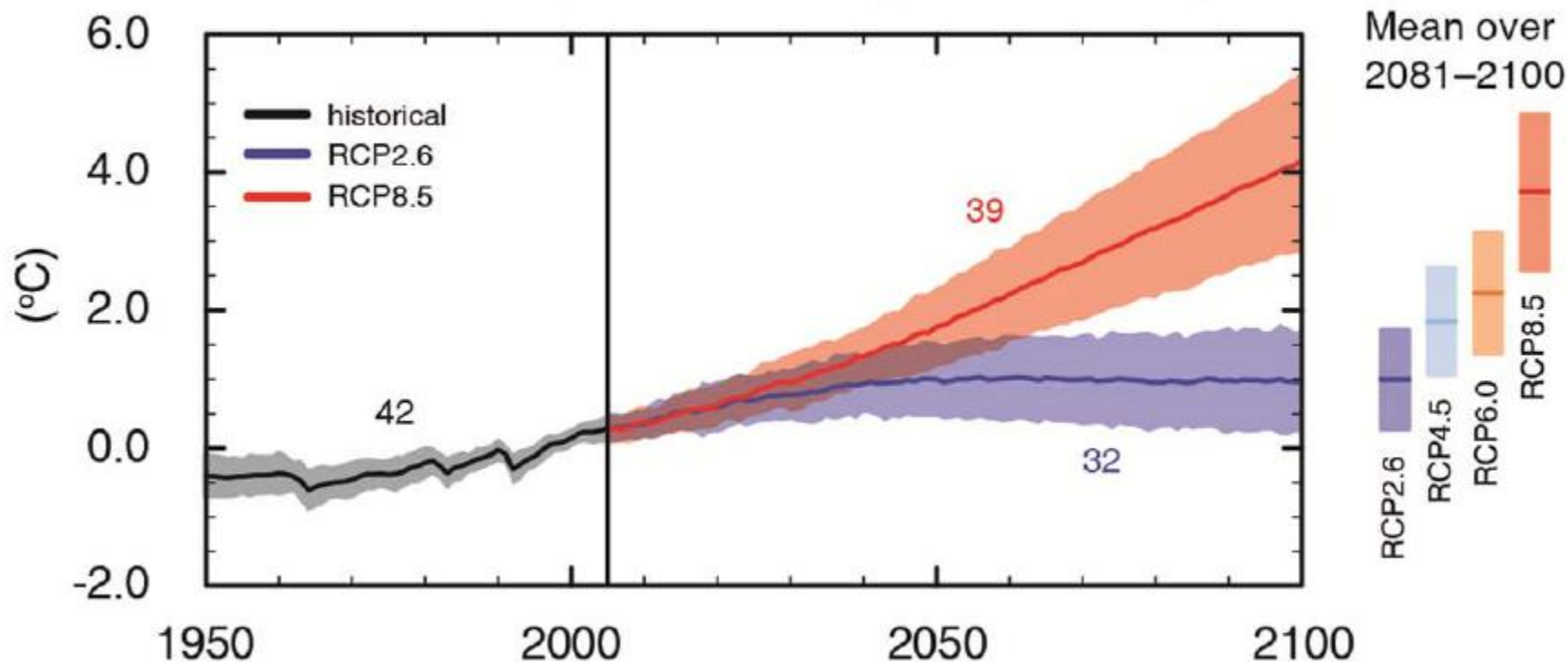


直接計算 (Direct Numerical Simulation) :

a.のようなバッチリ成り立つ仮定しか含まない数値計算

↔ 気候モデルは **b.のような仮定を山ほど含む**

# 予測される100年後の気温上昇量は？



社会の発展の仕方と対策の大きさに依存  
科学的な予測にも幅

# 予測の信頼性をどうやって測るか？

- 天気予報の場合

日々、予報が当たったか外れたかで、検証ができる

→ 予測の信頼性(成績)が測れる

- 温暖化予測の場合

予測の全体が検証できるのは100年後？

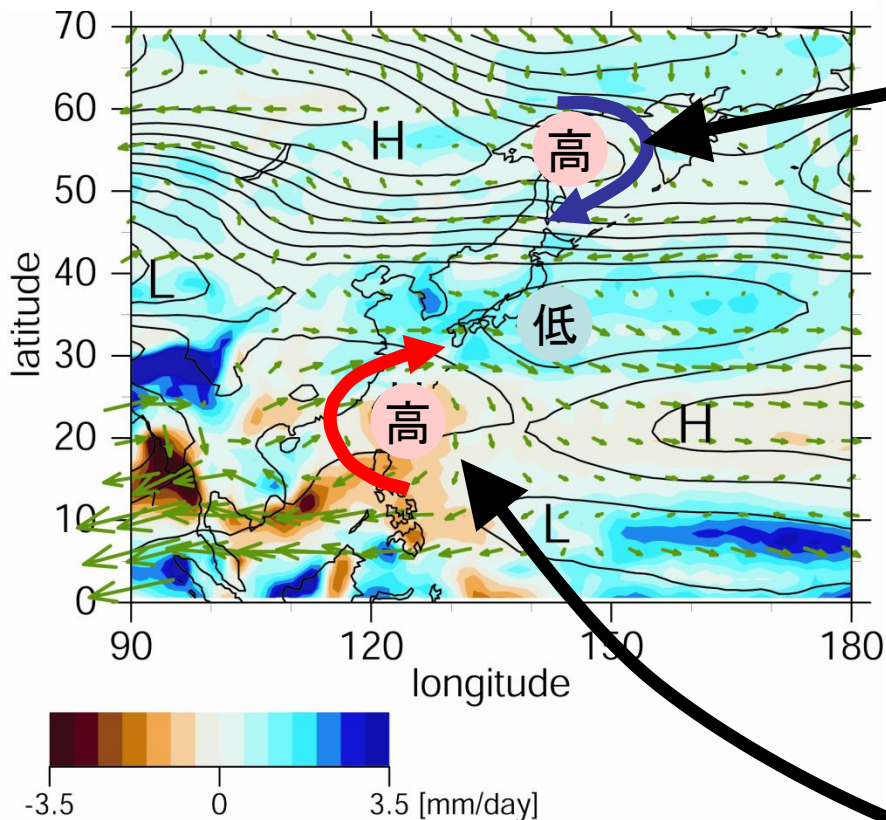
→ 予測の信頼性をどうやって測る？

# どのような予測には自信があるか？ (専門家判断)

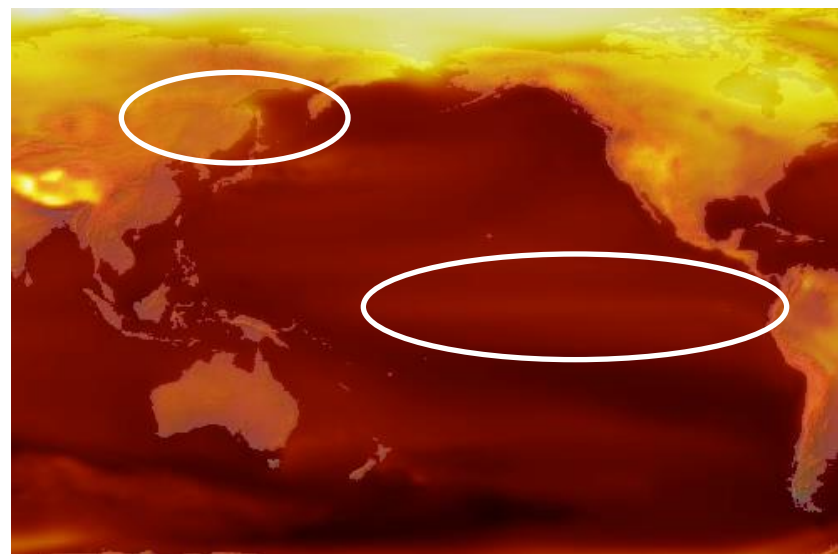
- 注目する変化が自然変動に比べて十分大きく、明瞭である
- 物理的・合理的に説明可能である
- 全ての(多くの?)モデルで傾向が一致する
- 注目する現象を現在の気候についてモデルがよく再現できる
- (観測された過去の傾向と一致する)

# 予測された日本の夏の変化

## 温暖化による変化(6-8月)



温度上昇が  
シベリア>オホーツク



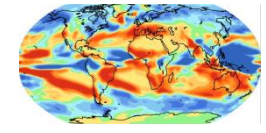
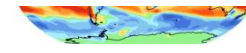
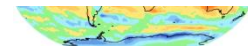
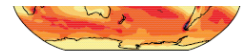
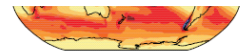
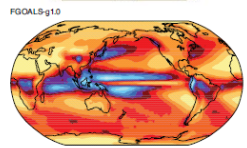
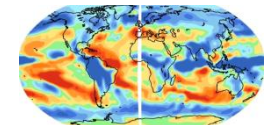
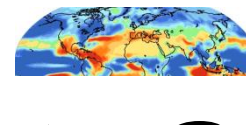
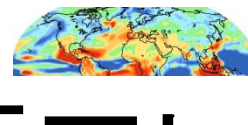
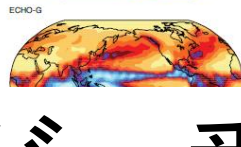
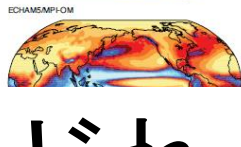
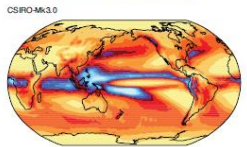
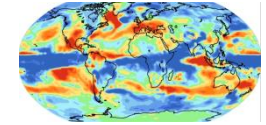
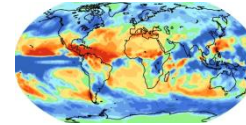
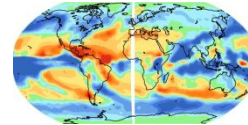
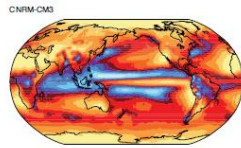
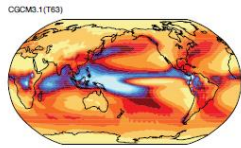
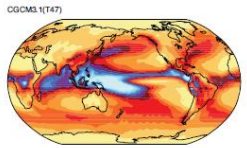
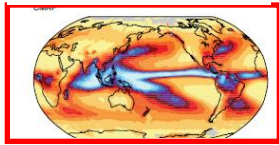
平均的に長梅雨型に移行  
梅雨は活発で長引く

熱帯太平洋の  
温度上昇が西<東  
(エルニーニョ型)

# 現在気候の降水量

# 温暖化による降水量変化

## 観測データ



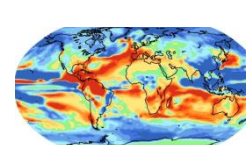
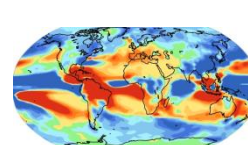
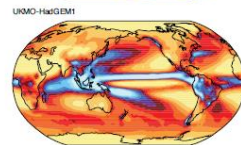
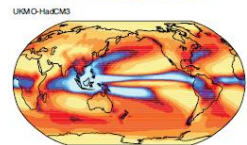
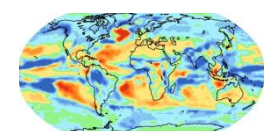
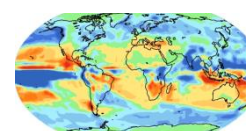
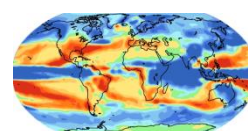
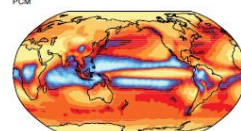
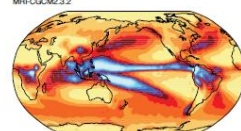
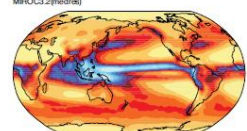
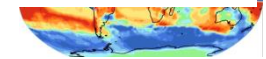
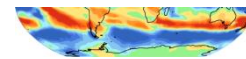
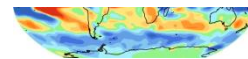
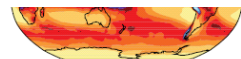
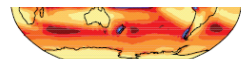
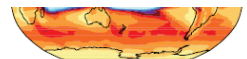
GISS-ADM

GISS-EH

GISS-ER

# どれが一番「正しい」?

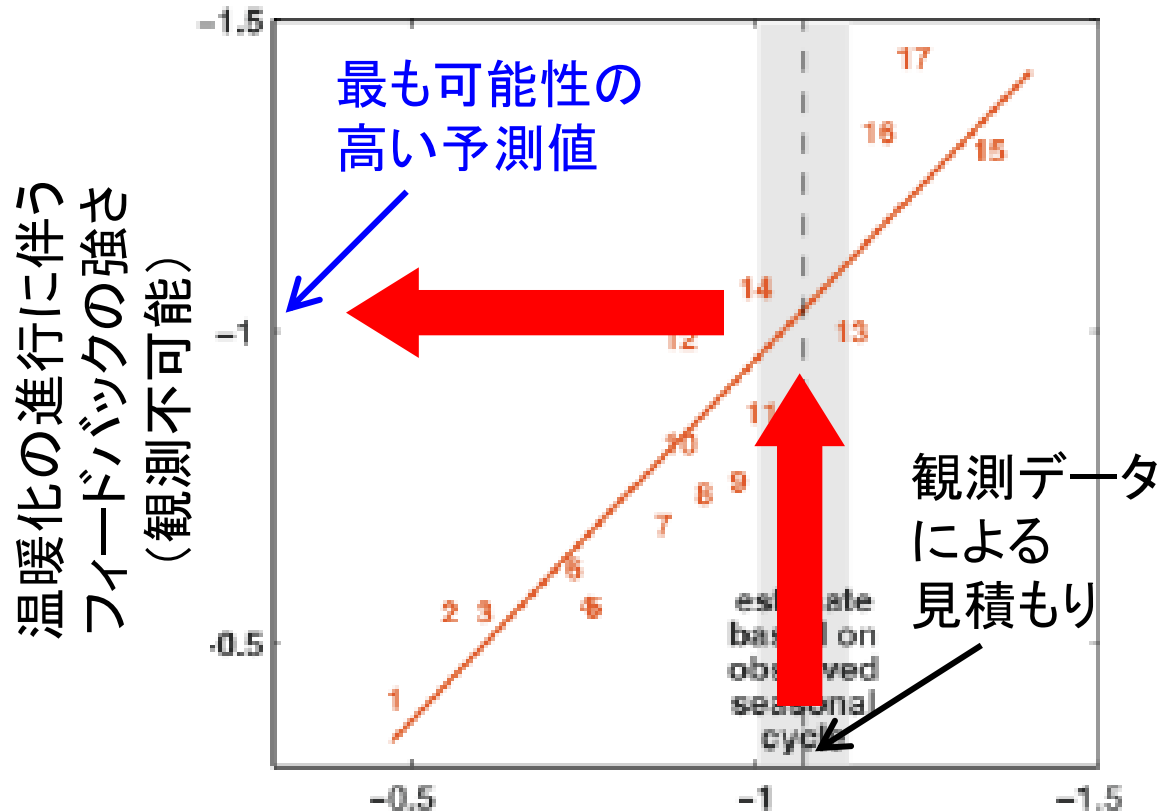
現在の降水量分布が観測データに近いほど、  
将来予測の降水量分布も正しいといえる?





# 性能評価指標と将来予測

積雪-アルベド(反射率)  
フィードバックの強さ



現在／過去の気候を再現する性能がよいモデルほど将来予測も正しいと一般にはいえない  
⇒モデルアンサンブル空間内で、将来予測と相関の高い性能評価指標を探す

# モデルの透明性

- 現実の社会の意思決定において参照されるモデルの重要な要件の一つに「透明性」があげられる。
- あるいは、一握りの専門家が作ったモデルの結果を社会が信用して受け入れるための条件やプロセスが重要な問題となる。
- 非専門家にとって、複雑な数理モデルは往々にしてブラックボックスであり、その妥当性や予測能力に対する信頼の根拠を得るのは難しい。(モデル・デバイド)
- ひどい場合には、恣意的な結果を出すためにモデルがでっちあげられたと疑われることさえある。

# モデルの透明性

- モデルの結果を社会に受け入れてもらうために、権威付けなどの方法に頼ることも可能だが、理想的には、モデルの原理、前提条件、検証結果、限界などを専門家と社会の間で十分にコミュニケーションすることが望ましいのではないか。(モデルの社会的な「透明性」)
- ソースコードの公開も有効かもしれないが(コードの透明性)、それだけで済む問題ではないだろう。
- 果たしてこのようなことが可能か。モデルが社会と本気で向き合う際には避けて通れない課題と考える。

# 3. 地球温暖化の懐疑論

# 「懷疑論」について

- 健全な科学的懷疑
  - 学問の発展に必要不可欠
- 不健全な懷疑
  - 「懷疑論」
  - 既存の知見の体系を正しく参照しない
    - よく調べない
    - 意図的に無視する
    - 意図的にゆがめる
    - 意図的に偏って参照する

# 温暖化は止まった？

今年の気温、21世紀で最低

科学

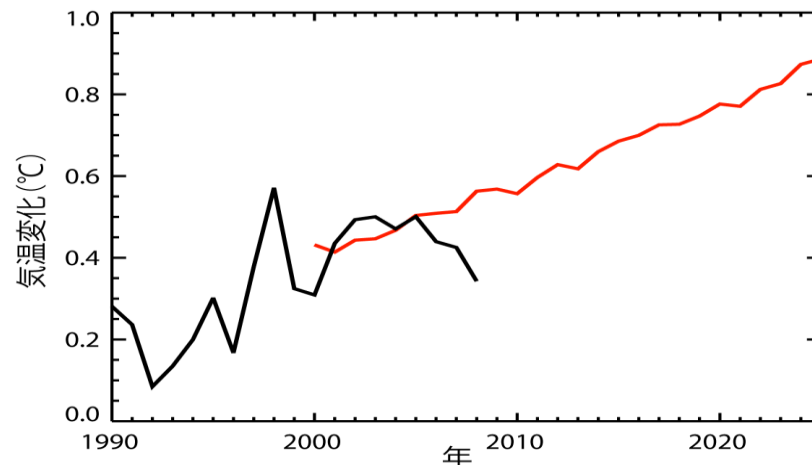
## 地球の気候 当面「寒冷化」 自然変動が温暖化抑制？

平均気温は一九七〇年代半ば以降ほぼ一貫して

上昇。しかし九八年をピークにこの十年間は横ばいしないし低下し、二〇〇八年の気温は二十一世紀に入り最も低かった。

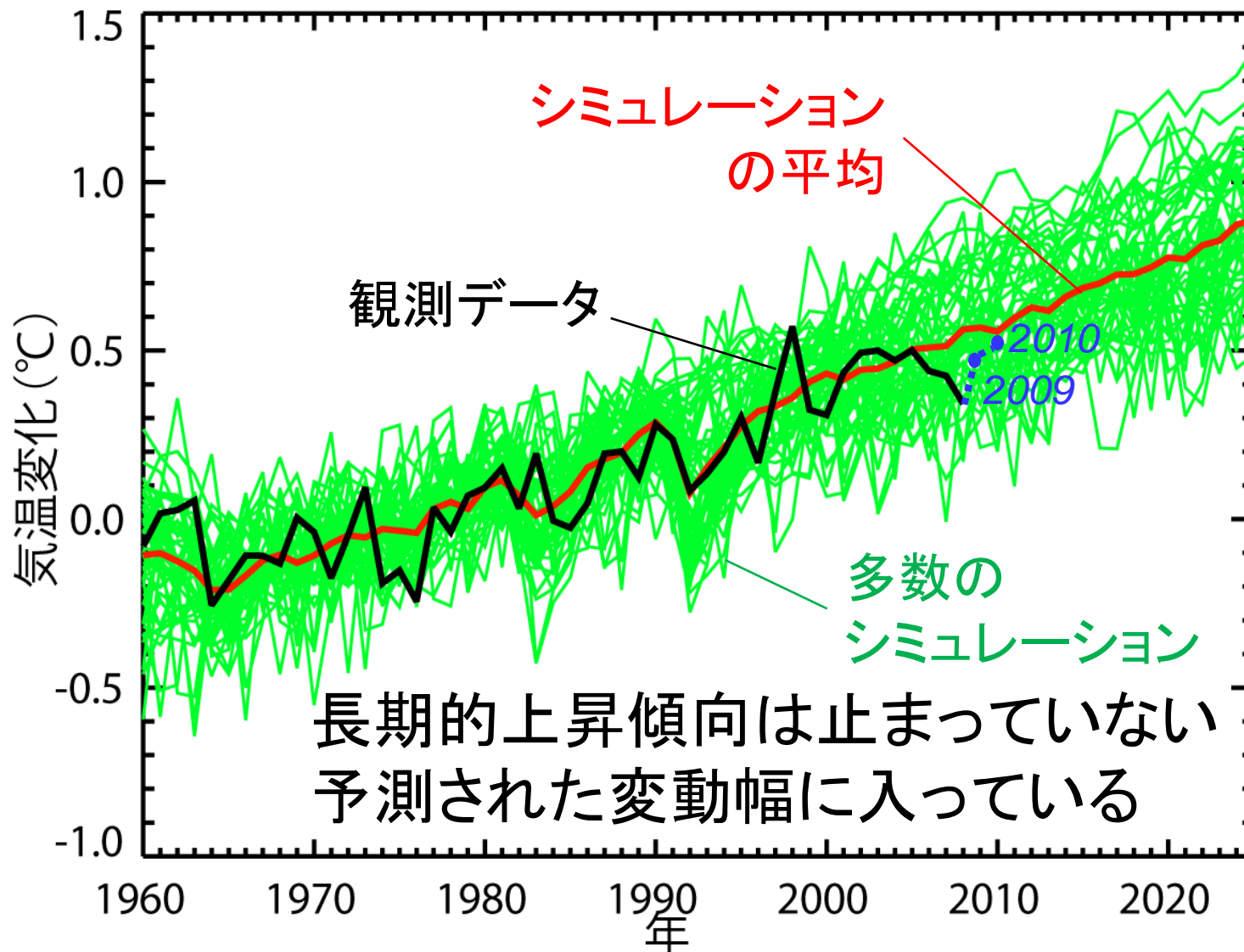
この結果、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）が予測する気温の上昇カーブとの隔たりが拡大。IPCCは気温

が二〇〇一―二五年に十一年あたり約〇・二度のペースで上昇するとしているが、実際は最近十年で約〇・二度下がった。気温低下の原因として、専門家が有力視しているのが、海の自然変動の影響。太平洋では数十年ご



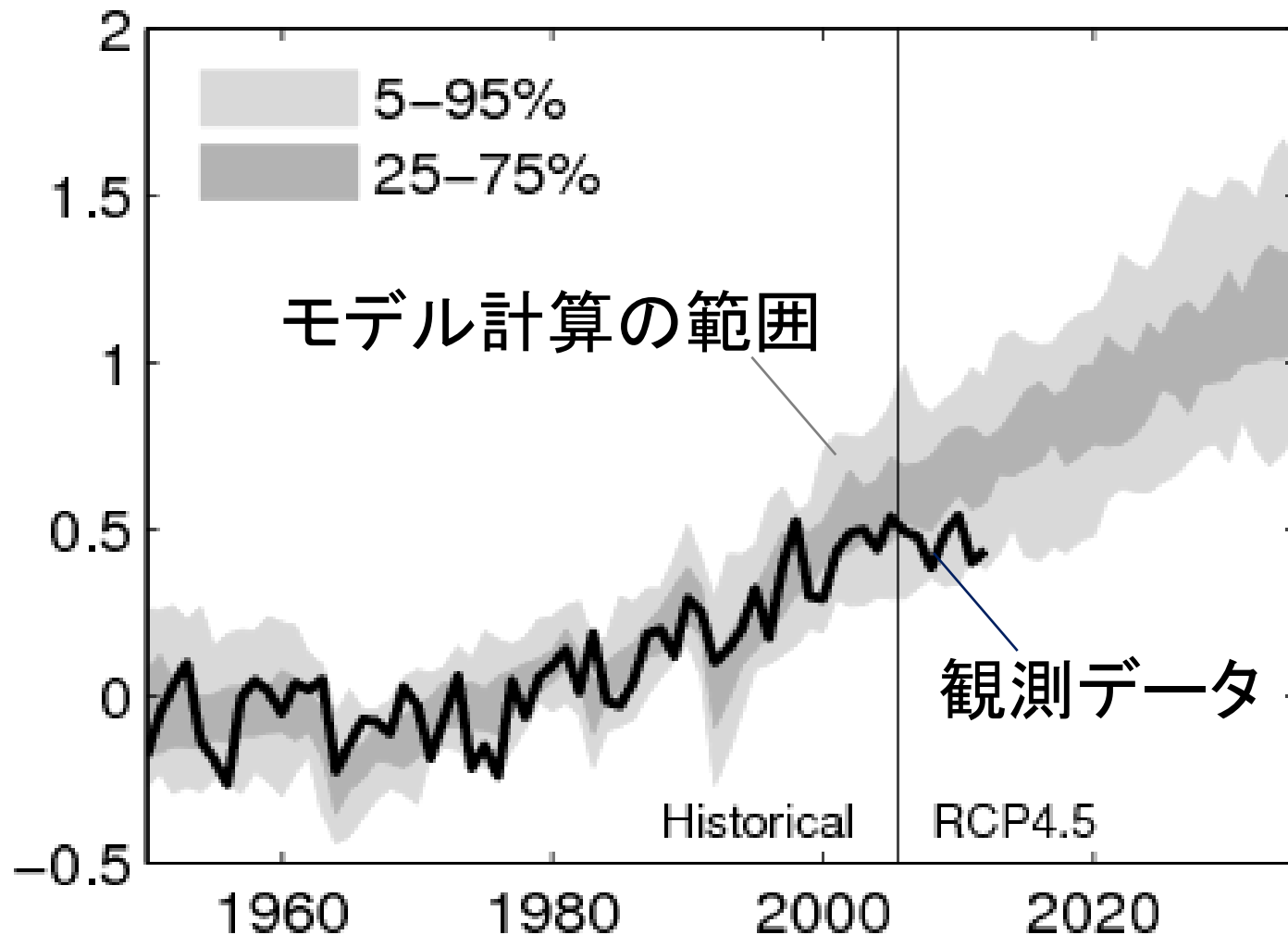
(2009. 2. 2. 日本経済新聞 科学面)

# 近年の世界平均気温の変化傾向



# 近年の世界平均気温の変化傾向

MASKED CMIP5 and HadCRUT4





# なぜ世界平均気温は予測されたほど上がっていないのか？

## 1. 自然の変動のため

- 過去にも上がらなかった時期がある
- 海洋深層が熱を吸収している

## 2. 外部的な条件のため

- 太陽活動の低下などが少し効いている？

## 3. 予測が大きすぎる？

- 温度が上がり過ぎるモデルは現実性が低い？

## 4. 実は上がっている？

- 観測データの無い極域で上がっている？

# 近年の気温上昇は人間活動のせい？

## 産業革命以降の気候変化要因

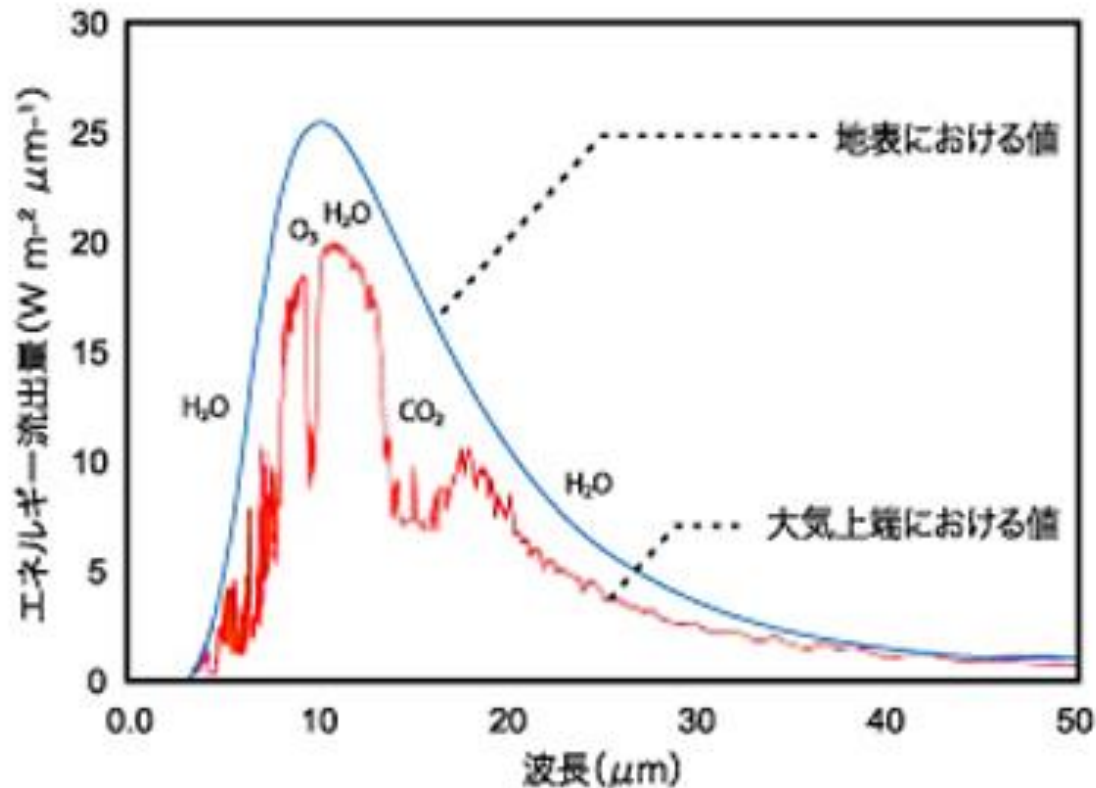
1750年を基準とした放射強制力



冷却効果

加熱効果

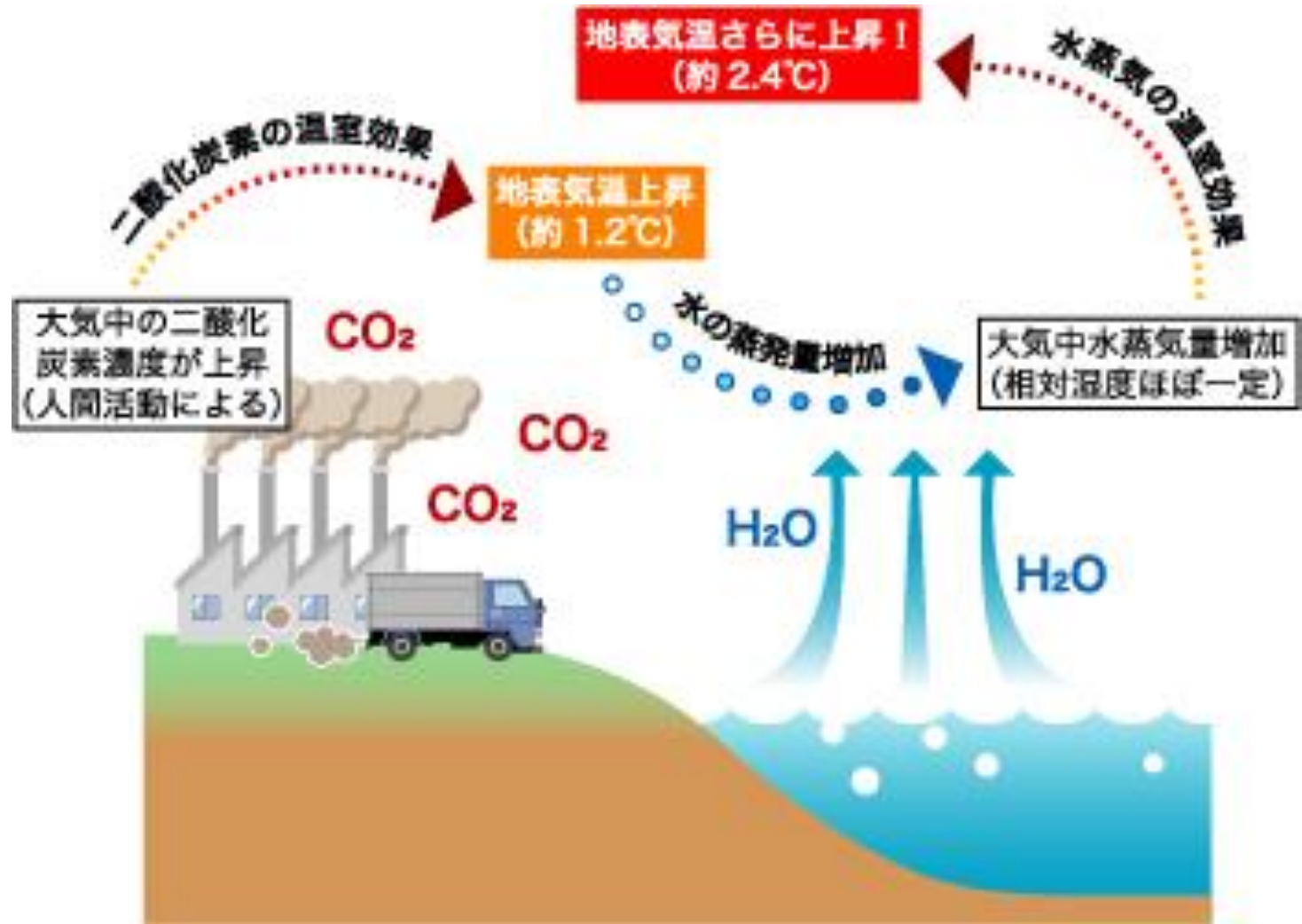
# 各温室効果ガスによる赤外線吸収



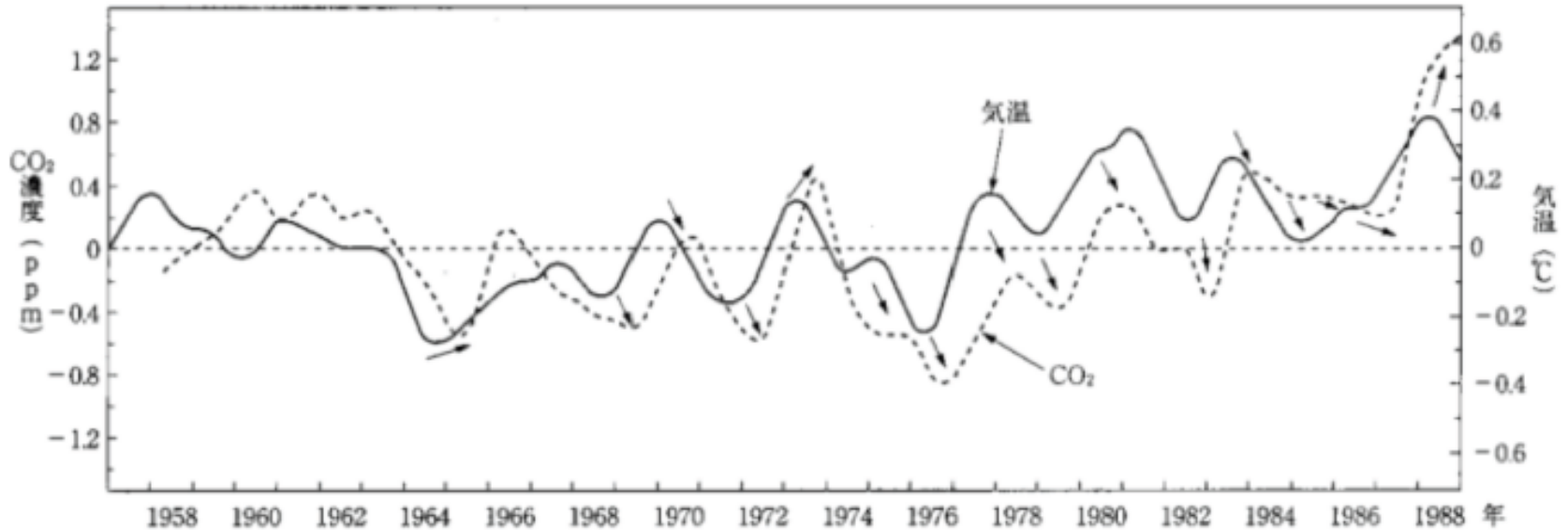
H <sub>2</sub> O	60%	(75Wm <sup>-2</sup> )
CO <sub>2</sub>	26%	(32Wm <sup>-2</sup> )
O <sub>3</sub>	8%	(10Wm <sup>-2</sup> )
その他	6%	(8Wm <sup>-2</sup> )

(Kiehl and Trenberth (1997)より)

# 水蒸気によるフィードバック



# 気温が原因でCO<sub>2</sub>が結果？



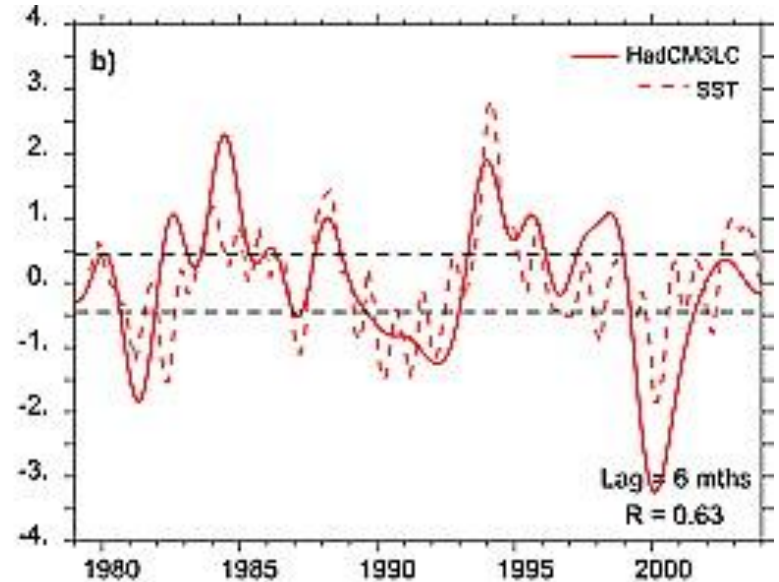
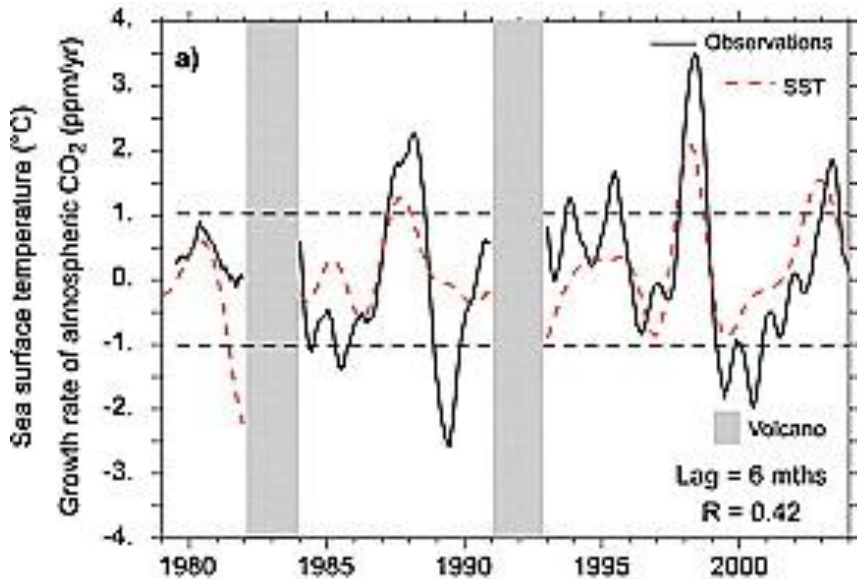
(根本 (1994)より)

気温、CO<sub>2</sub>とも、長期トレンドを除いたもの。

エルニーニョ現象などによる気温の変化と、それに対する主に陸上生態系の応答により説明できる。

長期的には人間が排出するCO<sub>2</sub>により気温が上昇していることと矛盾しない。

# 気温が原因でCO<sub>2</sub>が結果？

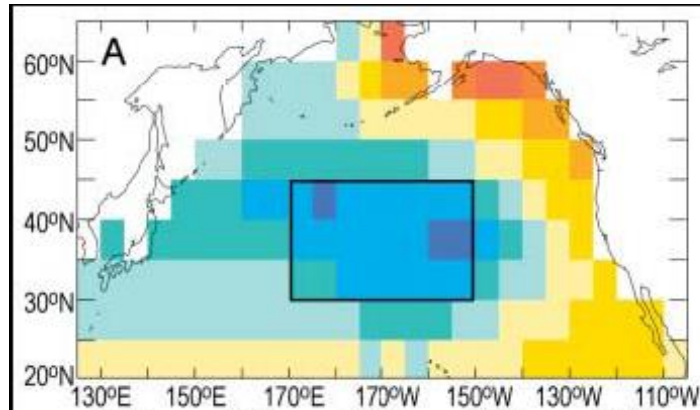


(Cadule et al., 2010)

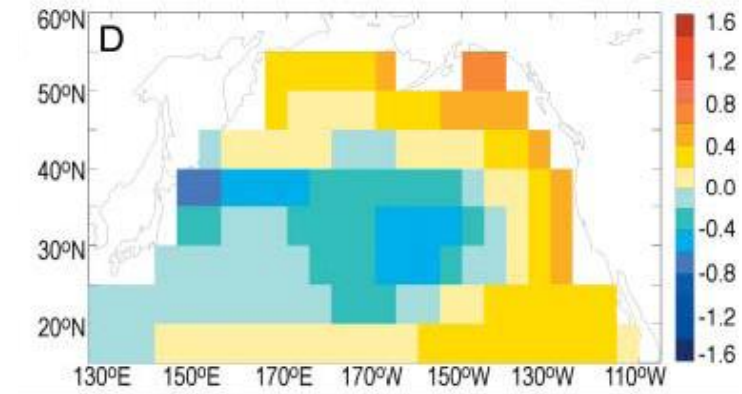
温度（この場合は海面水温）とCO<sub>2</sub>濃度の変動の位相関係は、気候モデル（右）でも観測（左）と似たパターンが再現できる。

# IPCCでは準周期変動(自然変動)を 考慮している

## 太平洋10年規模振動の海面水温変動パターン



観測データによるもの



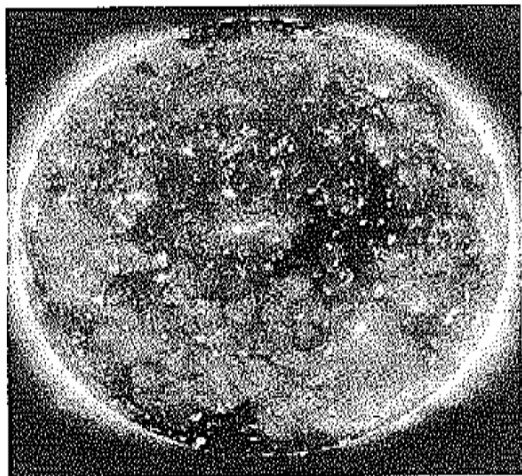
気候モデルの計算結果に  
よるもの

(Overland and Wang (2007)より)

赤祖父氏が主要な準周期変動として挙げている「太平洋10年規模振動」(Pacific Decadal Oscillation; PDO)は、温暖化予測に用いられるシミュレーションモデル(気候モデル)により再現されている。PDOは自然変動なので、大気海洋の物理法則を計算すれば自動的に再現できる。

# 太陽活動が弱まっている？

×線であらえた3月の太陽。暗い部分が多い。国立天文台提供



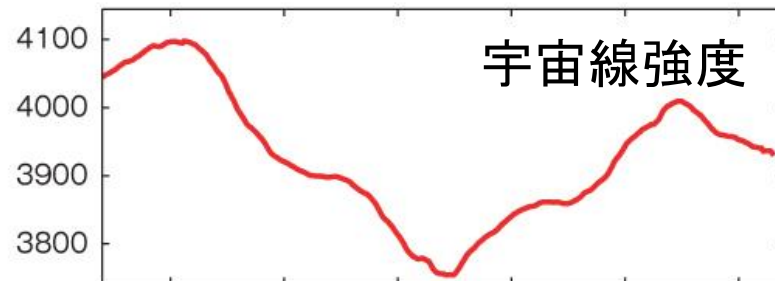
指標となる黒点がほとんど現れない。研究者も「このままだと地球は」

200年ぶり、地球「ミニ氷河期」

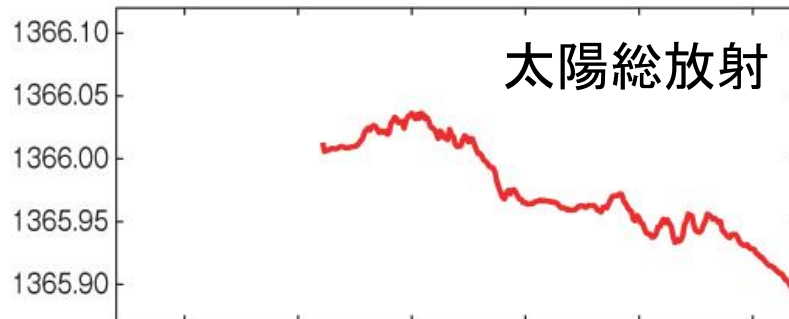
太陽活動は1985年ごろから弱まっているが、気温はその間も上昇。(宇宙線などの間接的効果を考慮しても同様)

(2009. 6. 1. 朝日新聞夕刊)

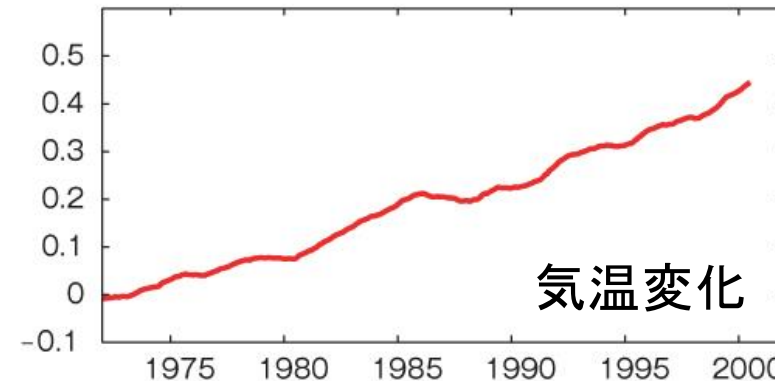
宇宙線の強度 (hr<sup>-1</sup>)



日射エネルギー量 (Wm<sup>-2</sup>)



世界平均気温変化 (°C)



(Lockwood and Frohlich (2007)より) 約11年周期の変動を平均化

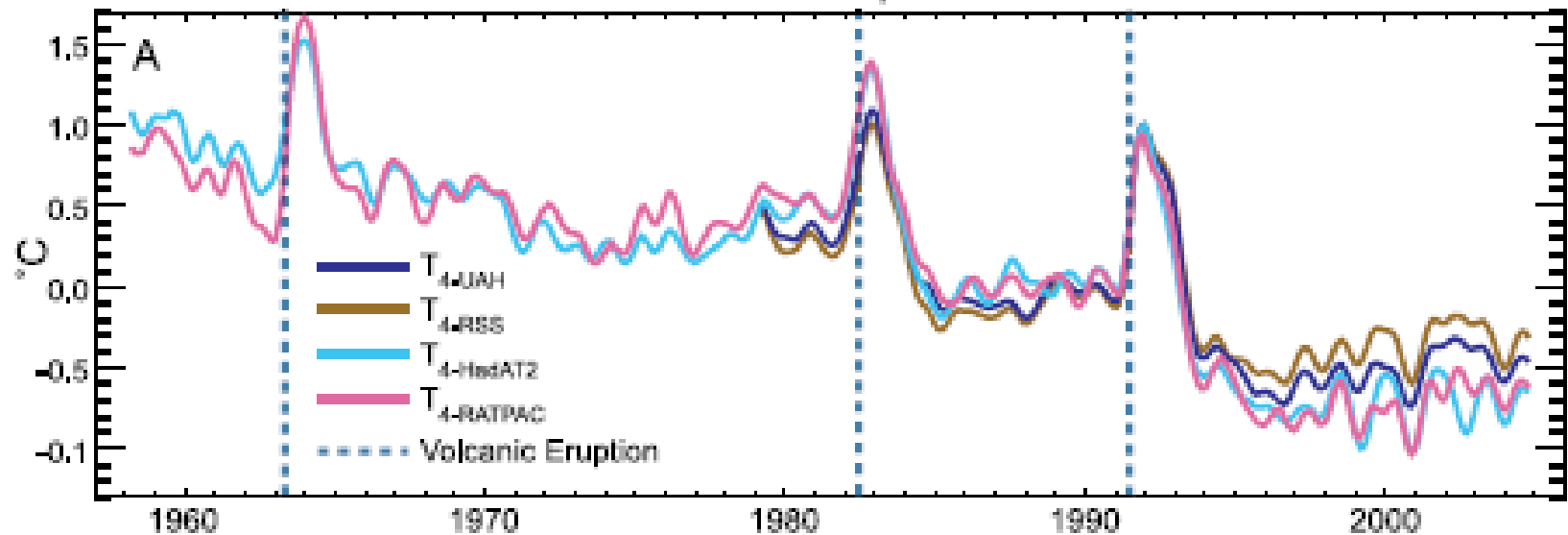


# 「太陽活動主因説」への質問

- 1980年代から太陽活動が弱くなっているのに気温が上がっているのはなぜ？
- 対流圏の温暖化にあわせて成層圏が寒冷化しているのはなぜ？
- CO<sub>2</sub>増加の影響(～1.7W/m<sup>2</sup>の加熱効果)はどこに消えた？

# 成層圏の寒冷化

Global Anomalies  
Lower Stratosphere



- 大気中温室効果ガスが増加すると対流圏が温暖化するとともに成層圏が寒冷化することが理論的にも気候モデル計算からも知られており、観測された成層圏寒冷化の主要な原因と考えられる(一部は成層圏オゾンの減少によると考えられる)。IPCC WG1 AR4, Figure 3.17より。

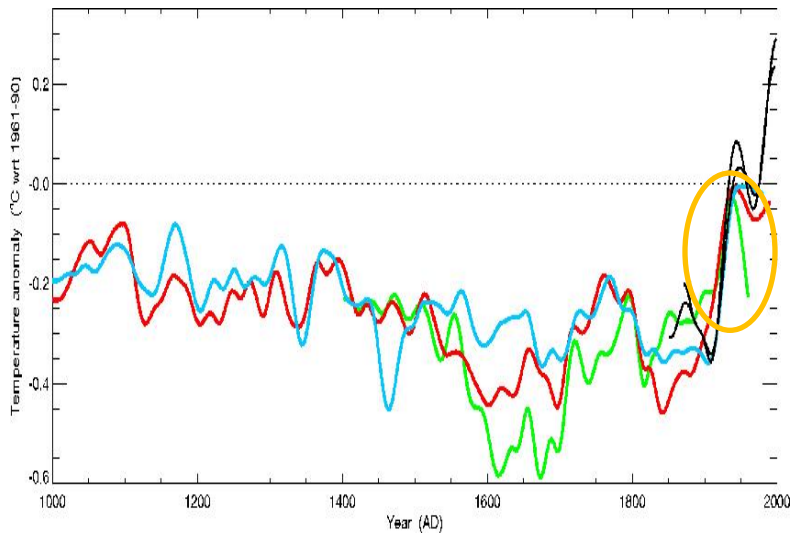
# East Anglia大学メール流出事件 (通称 ClimateGate)

- 2009年11月に英国East Anglia大学 気候研究ユニットの研究者のメール等が何者かによって持ち出され、インターネット上に流出
- メールの内容から、温暖化を示す科学的データに不正な操作等の疑い？
- 英国議会下院の委員会による調査報告  
→不正は見られないと結論
- 大学が依頼した独立調査委員会  
→不正は見られないと結論

# 問題になった主な内容

- 過去1000年の気温を推定するグラフ(ホッケースティック曲線)で、気温下降を隠す操作があった？
- 気象観測点等のデータ公開を拒み続けた？
- 懐疑論の論文を排除するように学術雑誌等に圧力をかけた？
- 懐疑論者に対する悪口等

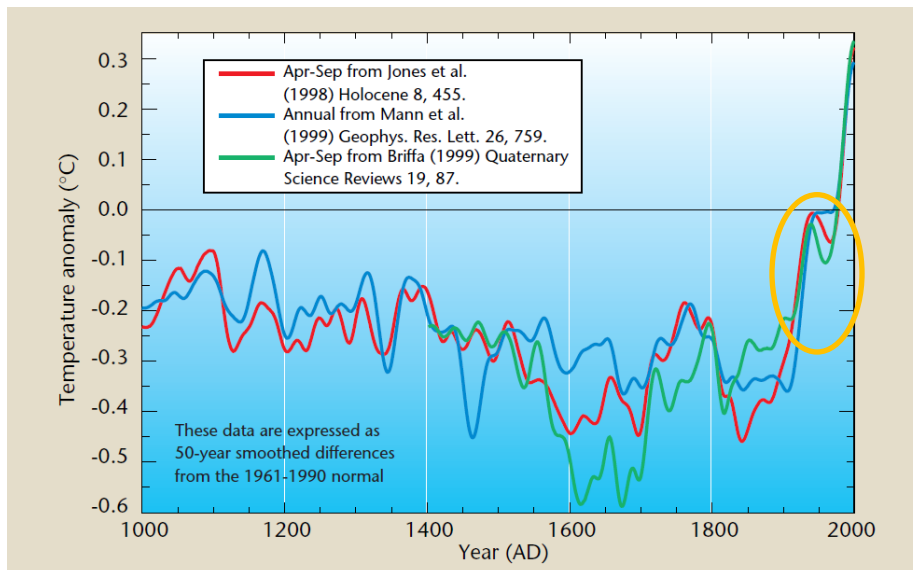
# メール流出で問題になったグラフ



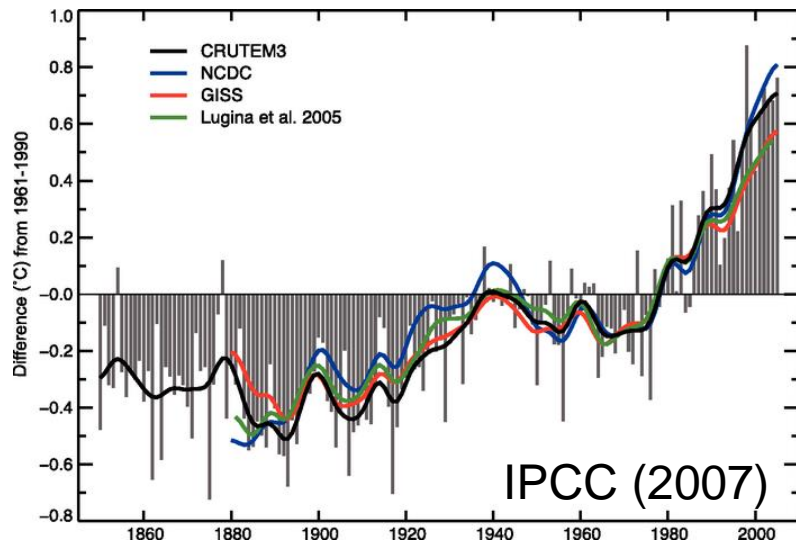
“hide the decline”  
“trick”

WMO報告書(2000)  
の図を準備している  
際のやりとり

実際には、年輪により  
推定された気温が下降  
することは論文で発表  
済みであり、不正な  
データ操作ではない

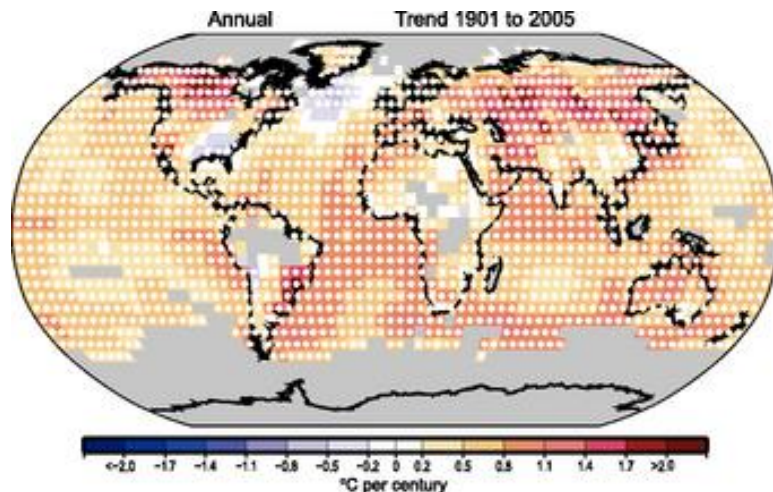


# 気象観測点のデータ公開問題



基本的なデータは米国のデータベースで公開されている

複数機関が解析して同様の結果が出ている



海上も温暖化傾向であるし、観測点の選び方によって温暖化しているように見せかけているということもない

IPCC (2007)

# メール流出事件が描き出した構造

## 主流研究者側

- 研究データ・過程の不透明性
- 研究者の派閥的な振舞い

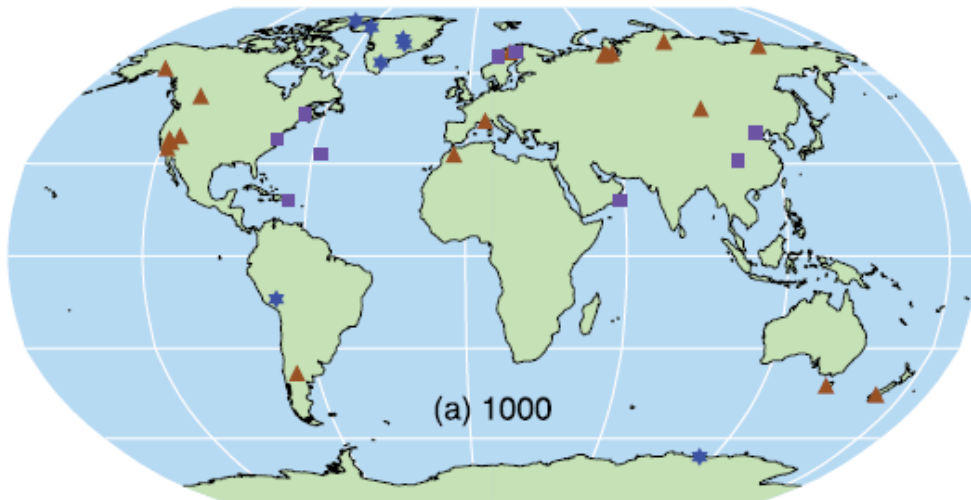
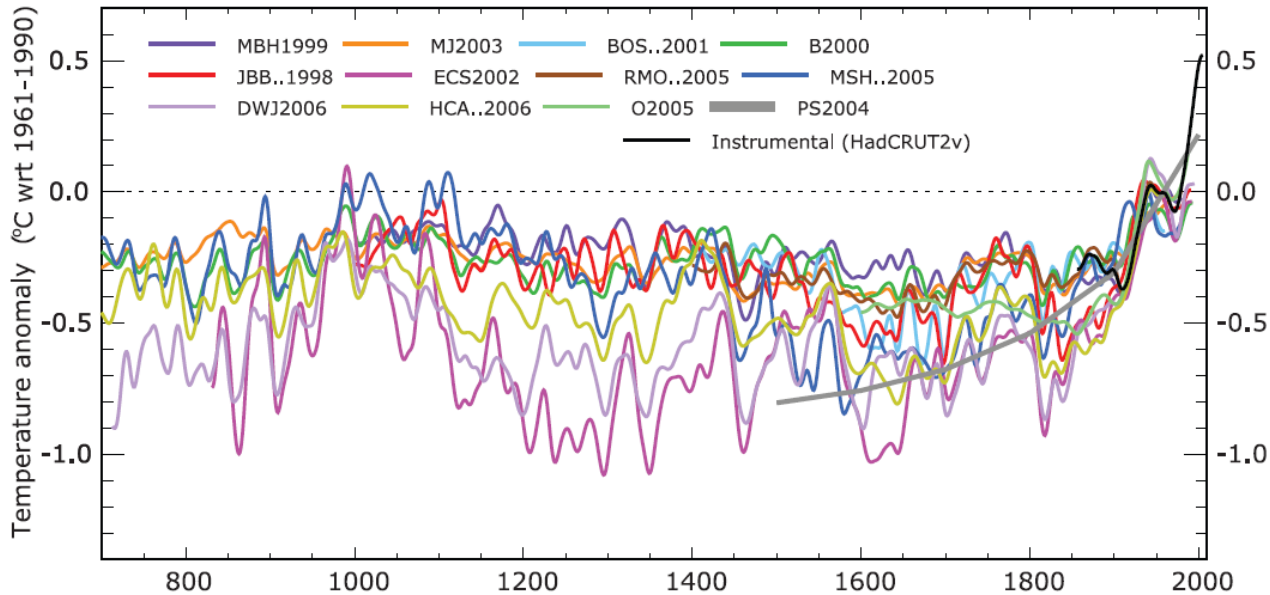
## 外部



- 専門外の研究者等によるデータ公開の要求（執拗だが、必ずしも政治的ではない）
- 温暖化懐疑論・否定論ロビー活動による研究者への攻撃、いやがらせ（政治的）

# 過去1000年の気温変動は？

## NORTHERN HEMISPHERE TEMPERATURE RECONSTRUCTIONS



IPCC WG1 AR4 Chap.6

西暦1000年時点での  
プロキシ分布

▲ = 年輪

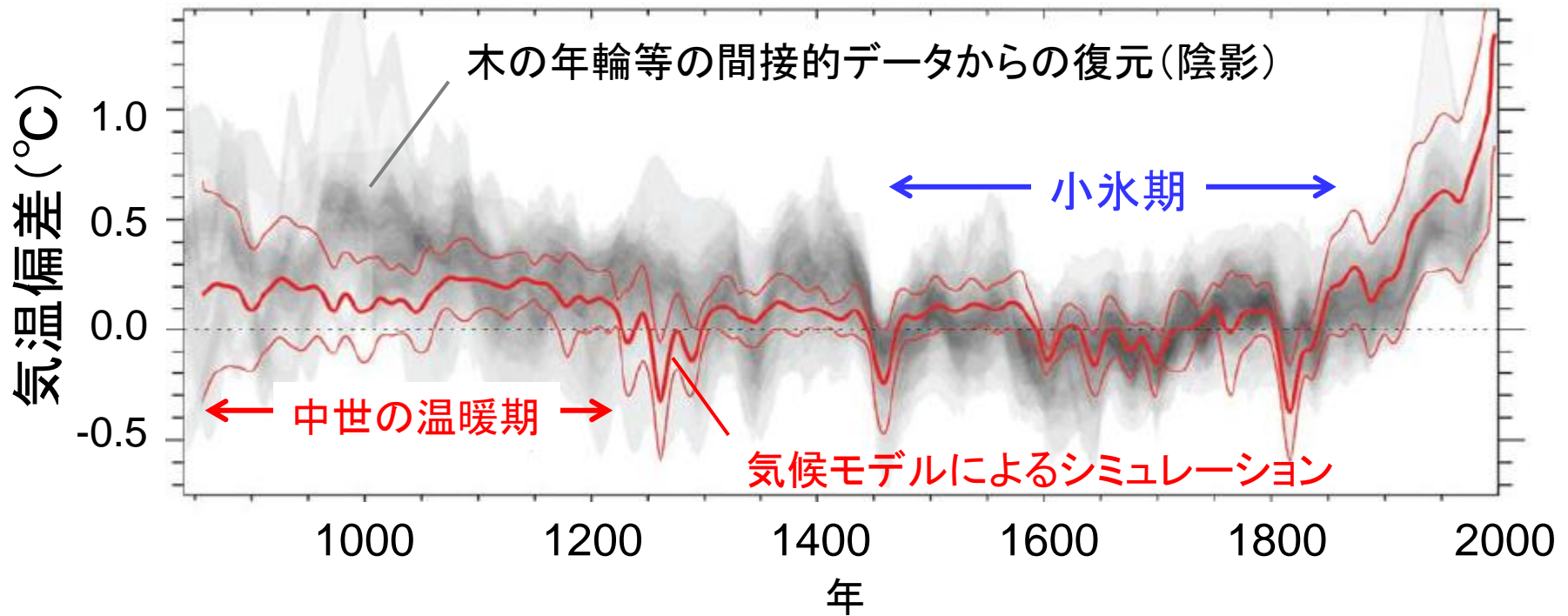
★ = アイスコア

■ = 他のデータ(堆積物等)



# 過去1000年の気温変動

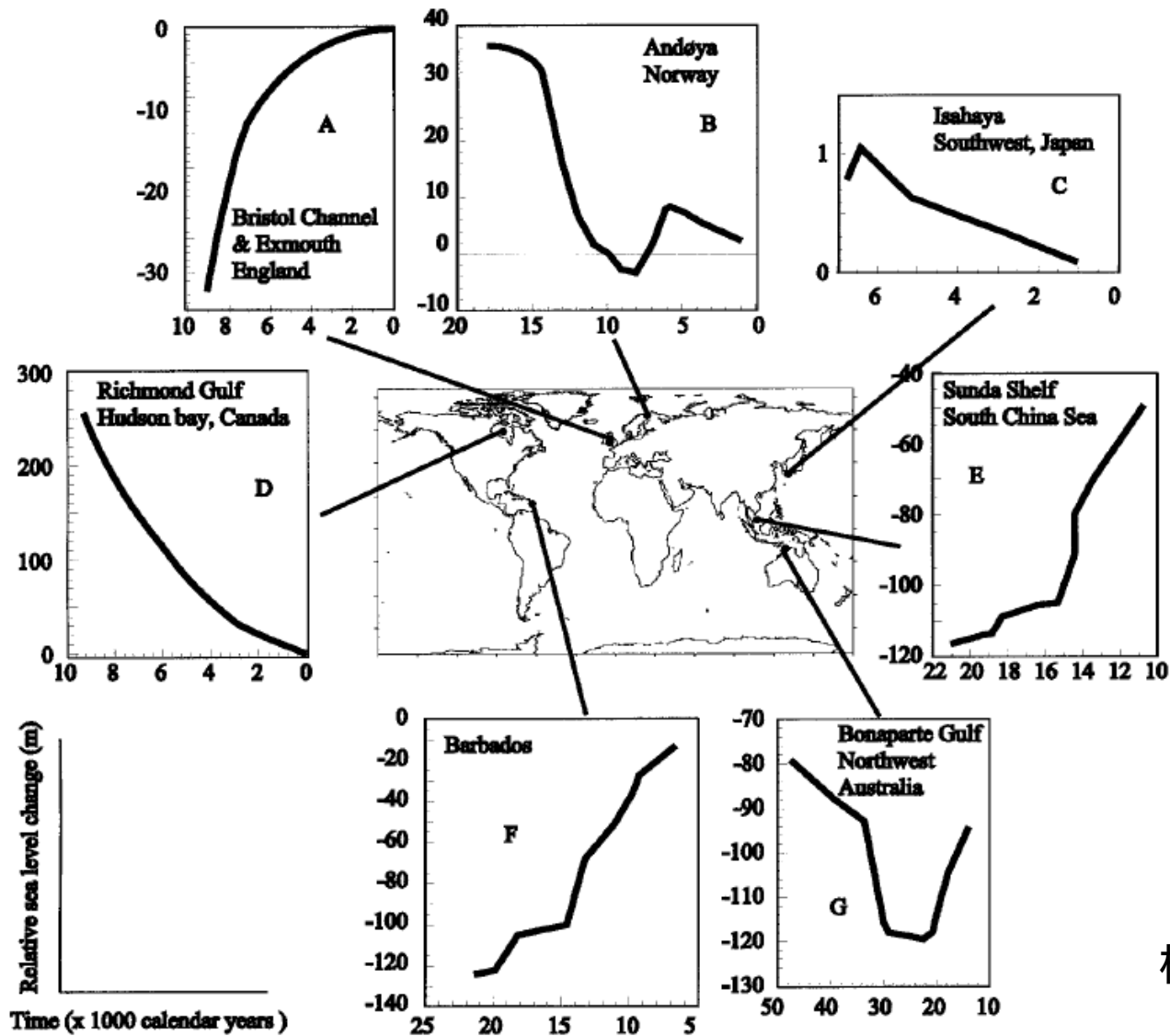
北半球の気温偏差 (1500-1850年の平均からの偏差)



太陽活動の低下が原因といわれる300年前ごろの  
小氷期の気温低下は1°C未満。

気候モデルによるシミュレーションで再現できる。

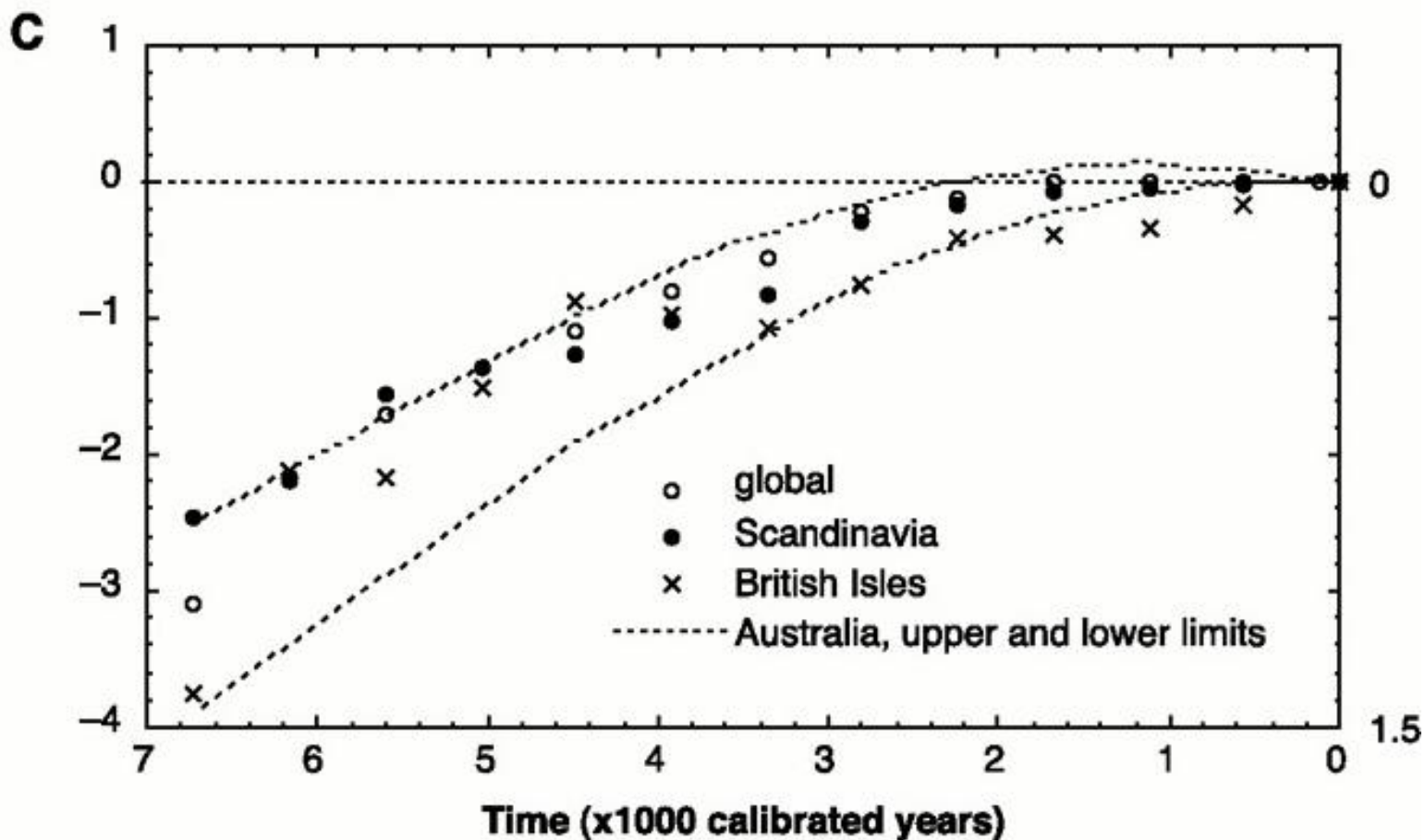
# 過去1万年の海水準変化



横山(2002)

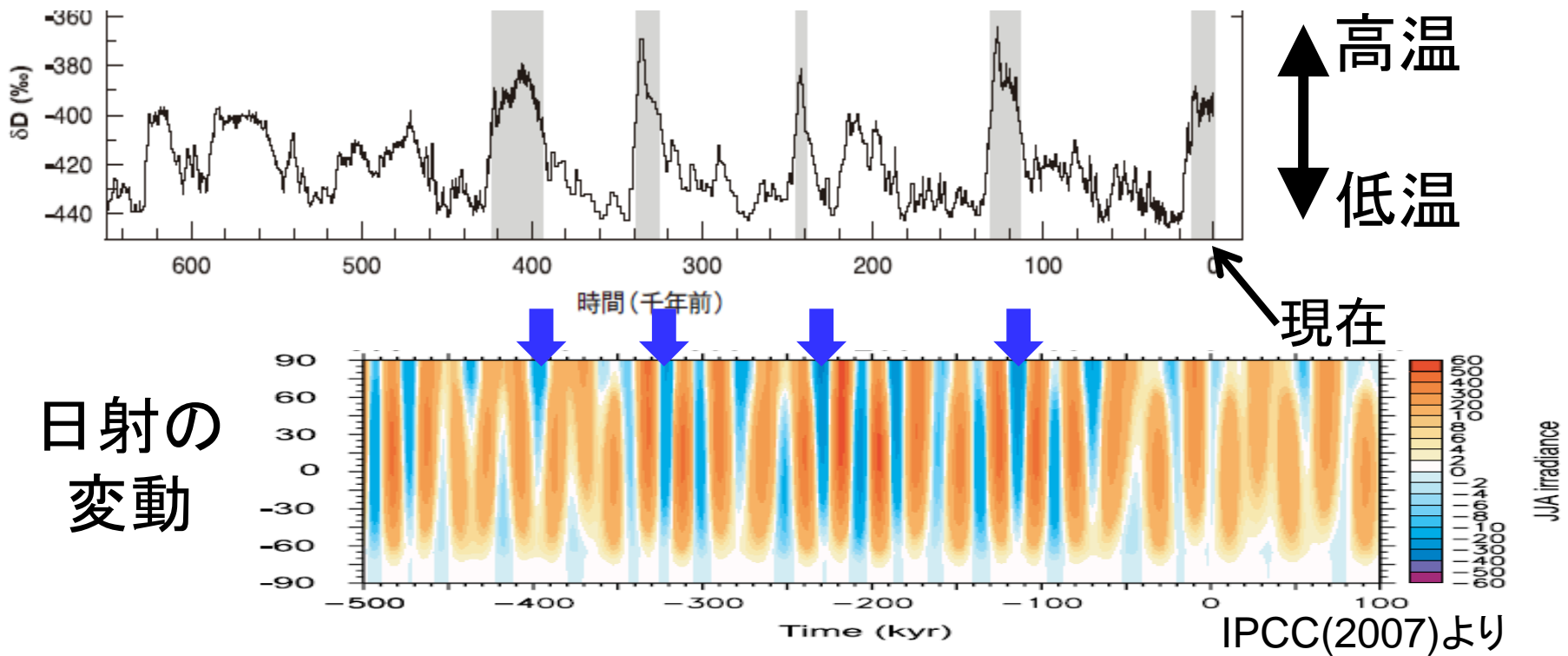
# 過去7000年の

## ice-volume equivalent sea level



Lambeck and Chappell (2001)

# 次の氷期の到来は？



氷期-間氷期は地球の公転軌道と自転軸の変化により日射の分布が変化して引き起こされる  
次の氷期をもたらす日射の減少はあと3万年以上起こらない→「もうすぐ氷期が来る」は誤り

# 温暖化影響に関するIPCC報告書の「誤り」？

- ヒマラヤの氷河の消失
  - 「2035年までに消失」→誤り
- オランダでの海面上昇影響
  - 「国土の55%が海面水位より下」→誤り

他に引用の仕方・バランスが問題になった箇所

- アフリカの農作物収量
- 災害の損失の変化傾向
- アマゾンの森林の大規模な枯死

(IPCCの全体的結論を揺るがすものではない)

# IPCCとは？

IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change (気候変動に関する政府間パネル)

- 設立 世界気象機関(WMO)及び国連環境計画(UNEP)により1988年に設立された国連の組織
- 任務 各国の政府から推薦された科学者の参加のもと、地球温暖化に関する科学的・技術的・社会経済的な評価を行い、得られた知見を政策決定者を始め広く一般に利用してもらうこと
- 構成 最高決議機関である総会、3つの作業部会及び温室効果ガス目録に関するタスクフォースから構成

## IPCCの組織

### IPCC総会

#### 第1作業部会(WG I): 科学的根拠

気候システム及び気候変化についての評価を行う。

共同議長 Dahe Qin (中国)  
Thomas Stocker (スイス)

#### 第2作業部会(WG II): 影響、適応、脆弱性

生態系、社会・経済等の各分野における影響及び適応策についての評価を行う。

共同議長 Christopher Field (米国)  
Vincente Barros (アルゼンチン)

#### 第3作業部会(WG III): 緩和策

気候変化に対する対策(緩和策)についての評価を行う。

共同議長 Ramon Pichs-Madruga (キューバ)  
Ottmar Edenhofer (ドイツ)  
Youba Sokona (マリ)

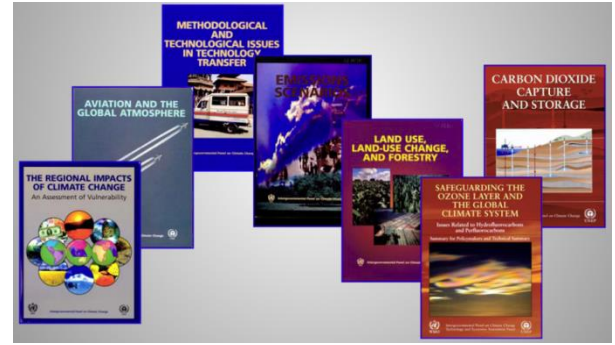
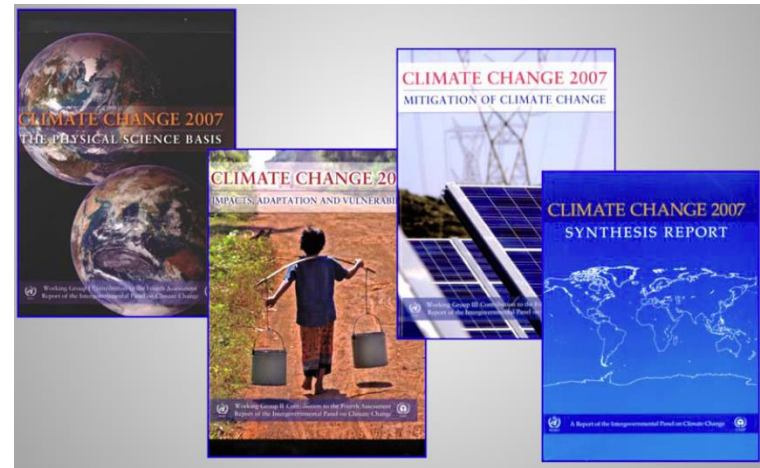
#### 温室効果ガス目録に関するタスクフォース

各国における温室効果ガス排出量・吸収量の目録に関する計画の運営委員会。

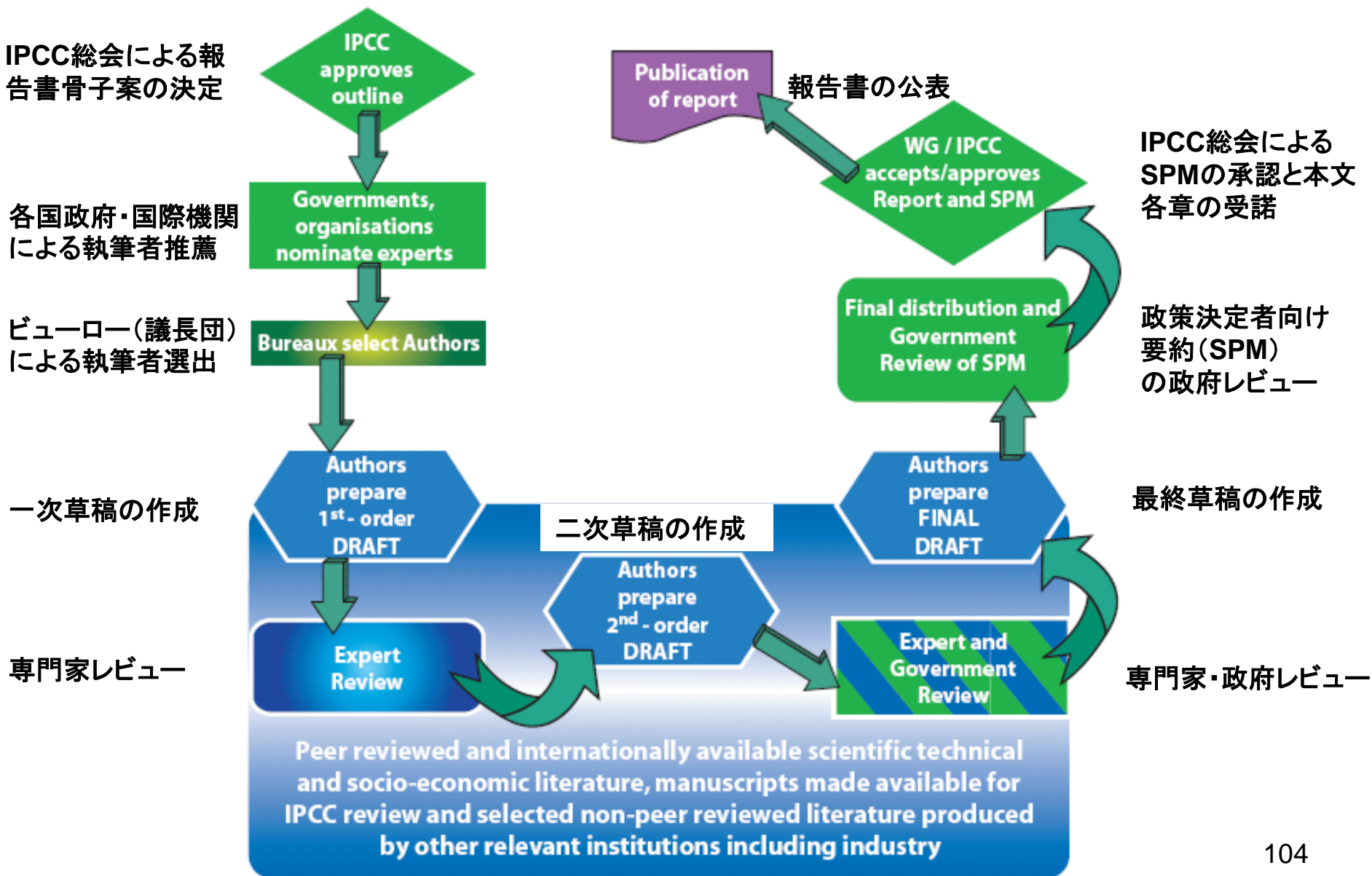
共同議長 Taka Hiraishi (日本)  
Thelma Krug (ブラジル)

# 過去に作成された報告書

- 4回の評価報告書 (1990, 1995, 2001, 2007)
- 1992年の補足報告・1994年の特別報告
- 7つの特別報告書
- 国別温室効果ガスインベントリガイドライン・グッドプラクティスガイダンス (1995-2006)
- 6つの技術報告書 (1996-2008)



# IPCC報告書が公表されるまで





## 特記すべきIPCCの性質・きまりごと

- 政府間パネルであること。
- 包括的・客観的で透明性のある評価であること。
- 政策に関して中立であること。
- レビュープロセスを重視すること。
- 研究やモニタリングを独自には実施しないこと。

## 報告書の包括性・客観性を高めるための工夫

- 各国政府推薦による執筆者候補リストの作成
- 執筆者選出の際の地域・専門分野バランスへの配慮
- 査読論文に基づく草稿作成（一部例外あり）
- 多数の査読者の協力を得た複数回にわたるレビュープロセス
- レビュー編集者によるレビュー意見対応の監視
- 提出されたレビュー意見の公開
- 作業部会総会での一行ずつ全会一致でのSPM承認

# Inter Academy Council (IAC)によるIPCCプロセスの評価

- IPCCのプロセスや手続きについての評価
- 2010年8月30日に報告書を国連に提出

Home InterAcademy Council website Contact

InterAcademy Council  
**Review of the IPCC**  
An evaluation of the procedures and processes of the InterGovernmental Panel on Climate Change

SCIENCE FOR A BETTER FUTURE  
InterAcademy Council

**About**  
Overview  
About IAC  
Media

**Committee**  
Bios  
Statement of Task

**Action Plan**  
Review Steps  
Submit Comments

**Report**  
Preorder Print  
Preorder Electronic

The InterAcademy Council is conducting an independent review of the processes and procedures of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Based on this review, the IAC will issue a report with recommended measures and actions to strengthen IPCC's processes and procedures so as to be better able to respond to future challenges and ensure the ongoing quality of its reports.

**Latest News** Media Contacts

2 June 2010  
**Webcast June 15**  
Listen to presentations at McGill University in Montreal by scientists with varying perspectives of IPCC processes. (Agenda)  
[Read More](#)

10 May 2010  
**Webcast May 14**  
IPCC and UN officials to speak at first committee meeting on May 14 in Amsterdam.  
[Read More](#)

3 May 2010  
**Committee Announcement**  
Former Princeton University President Harold T. Shapiro will chair IPCC review committee.  
[Read More](#)

**Receive Copy of Report To U.N.**  
[Pre Order Now.](#)

**What do you think?**  
[Comment.](#)

# Inter Academy Council (IAC)によるIPCCプロセスの評価

- IPCCの評価プロセスは全体としては成功であった。
  - しかし、世界はIPCCの創設以来相当に変化しているため、それに適応するためには評価プロセスの改善が必要。
    - 執行委員会の設置による組織運営の強化。
    - 査読コメントへの応答プロセスの改善。
    - 不確実性の表現の改善。
    - コミュニケーション戦略の改善。
- など

## 第5次評価報告書に向けて

- 2008年4月のIPCC第28回総会で、第5次評価報告書の作成が決議された。
- スコーピング会合等での専門家も交えた検討を経て、2009年10月のIPCC第31回総会で3つの作業部会報告書の骨子と作成スケジュールが合意された。
- 各国政府・国際機関の推薦に基づき、2010年6月にビューローによる執筆者等の選出が実施・公表された。
- 2013年(WG1)～2014年(WG2・WG3・統合報告書)に公表予定。

# IPCC報告書誤引用問題

IPCC

- 執筆者のルール不遵守
- 査読システムの不完全性
  - 訂正処理の遅れ？

一度訂正を  
出すと  
必要以上の  
信頼低下

政治的プレッシャー

- 権威として社会が大きく期待（無謬神話？）
- 権威の源泉として濫用も？（「25～40%」など）
- 激しい政治的論争状態（温暖化懐疑論・否定論  
ロビー活動が常に粗探しを狙っている状態）

# 「懐疑論」の背景にあるもの

- 本質的な科学の不確実性
- 単純な環境保護論に対する反発、警鐘
- 既得権者の抵抗(石油石炭業界)
- イデオロギー対立(新自由主義、反原発)
- 学問分野間のやっかみ
- 無責任な評論家(新奇性の誘惑)
- 社会の不透明性

# 信頼できる情報を見分けるリテラシー

- 論理の整合性に注目

同一の論者の主張の中に矛盾が無いか

- 引用等の正確性に注目

原典を確認→都合のよい引用、歪んだ引用をしていないか

- 中立性に注目

「何を書くか」だけでなく「何を強調するか」  
や「何を書かないか」にも注目



## 4. 地球温暖化のリスクに どう向き合うか

# リスク管理オプション

	自動車事故	地球温暖化
• リスク回避 (risk avoidance)	自動車に 乗らない	無し？ (気候工学？)
• リスク低減 (risk reduction)	安全運転・ シートベルト	緩和・適応・ 気候工学
• リスク移転 (risk transfer)	自動車保険	保険 (適応として)
• リスク保持 (risk retention)	リスクを承知で 自動車に乗る	ある程度の リスクを覚悟

# 気候変動関連リスクを「全体像」で捉える

## 気候変動の悪影響

- 熱波、大雨、干ばつ、海面上昇
- 水資源、食料、健康、生態系への悪影響
- 難民・紛争増加？
- 地球規模の異変？
- ...

## 気候変動の好影響

- 寒冷地の温暖化による健康や農業への好影響
- 北極海航路
- ...

## 対策の悪影響

- 経済的コスト
- 対策技術の持つリスク(原発など)
- バイオマス燃料と食料生産の競合
- 急激な社会構造変革に伴うリスク
- ...

## 対策の好影響

- 気候変動の抑制、悪影響の抑制
- 省エネ
- エネルギー自給率向上
- 大気汚染の抑制
- 環境ビジネス
- ...

悪影響、好影響の出方は、国、地域、世代(現在⇔将来)、社会的属性(年齢、職種、所得等)によって異なる。

# 「異常気象と人類の選択」

江守(2013、角川SSC新書)

－はじめに

I 地球温暖化問題は今どうなっているのか

1. 異常気象が増えている？
2. 地球温暖化は本当か？

II 地球温暖化問題をこれからどう考えればよいか

3. 対策積極派vs慎重派の対立構造をどう超えるか
4. 誰がリスクを判断するのか

－ おわりに～持続可能性と人類の選択

# 対策積極派と慎重派

## 対策積極派の主張

「温暖化の影響は将来の人類のみならず、今生きているわれわれにも莫大な損失を与えるものである一方、大規模な対策は実現可能であり、対策の経済的コストはそれほど大きくないどころか、対策を推進することで新たなビジネスチャンスも生まれる。」

## 対策慎重派の主張

「積極派が言っているような大規模な対策には膨大な経済的コストがかかる上に、コスト以外にも様々な問題があるので現実的ではない一方、温暖化の影響には良いことだってあるし、悪い影響もそれほど深刻なものであるかは疑わしい。」

# 対策積極派と慎重派の動機

## 対策積極派の動機

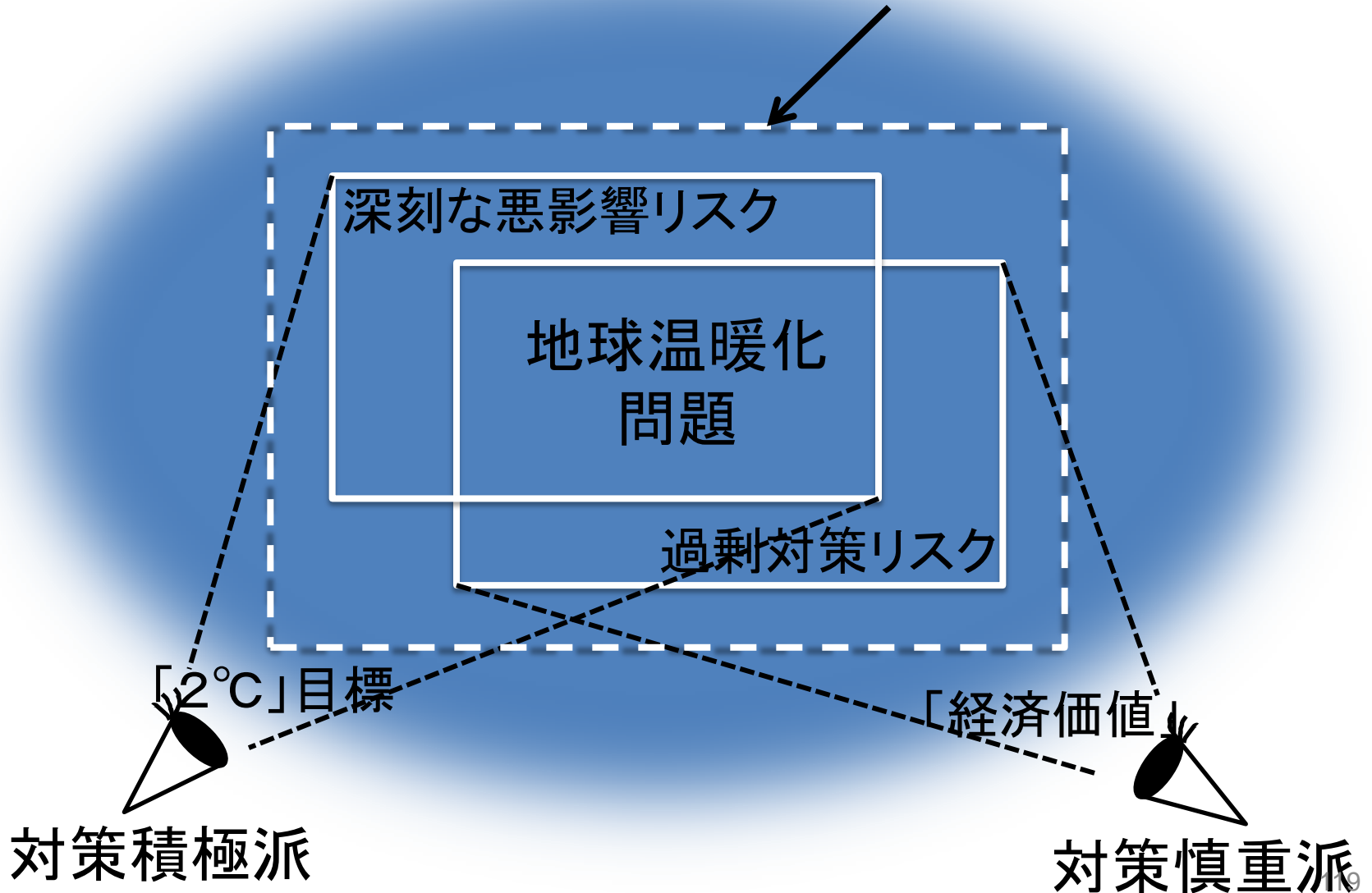
- 行き過ぎた現代文明の見直し
- (自然への畏怖)

## 対策慎重派の動機

- 現実主義
- (エコブームへの反発)
- (経済的新自由主義)

# フレーミングのずれ

一回り大きなフレームが必要



# フレーミングのずれ

## 積極派の「2°C」のフレーミング

- 「2°C」(たとえば)を超えてはいけないと認識
- 将来にわたっての排出上限が決まる
- 限られた排出量の分配の問題になる

## 慎重派の「経済価値」のフレーミング

- 「経済価値」を最大化すべきと認識
- 費用対効果分析(割引率を考慮)
- 対策の「やり過ぎ」は正当化されない



# フレーミングのずれ

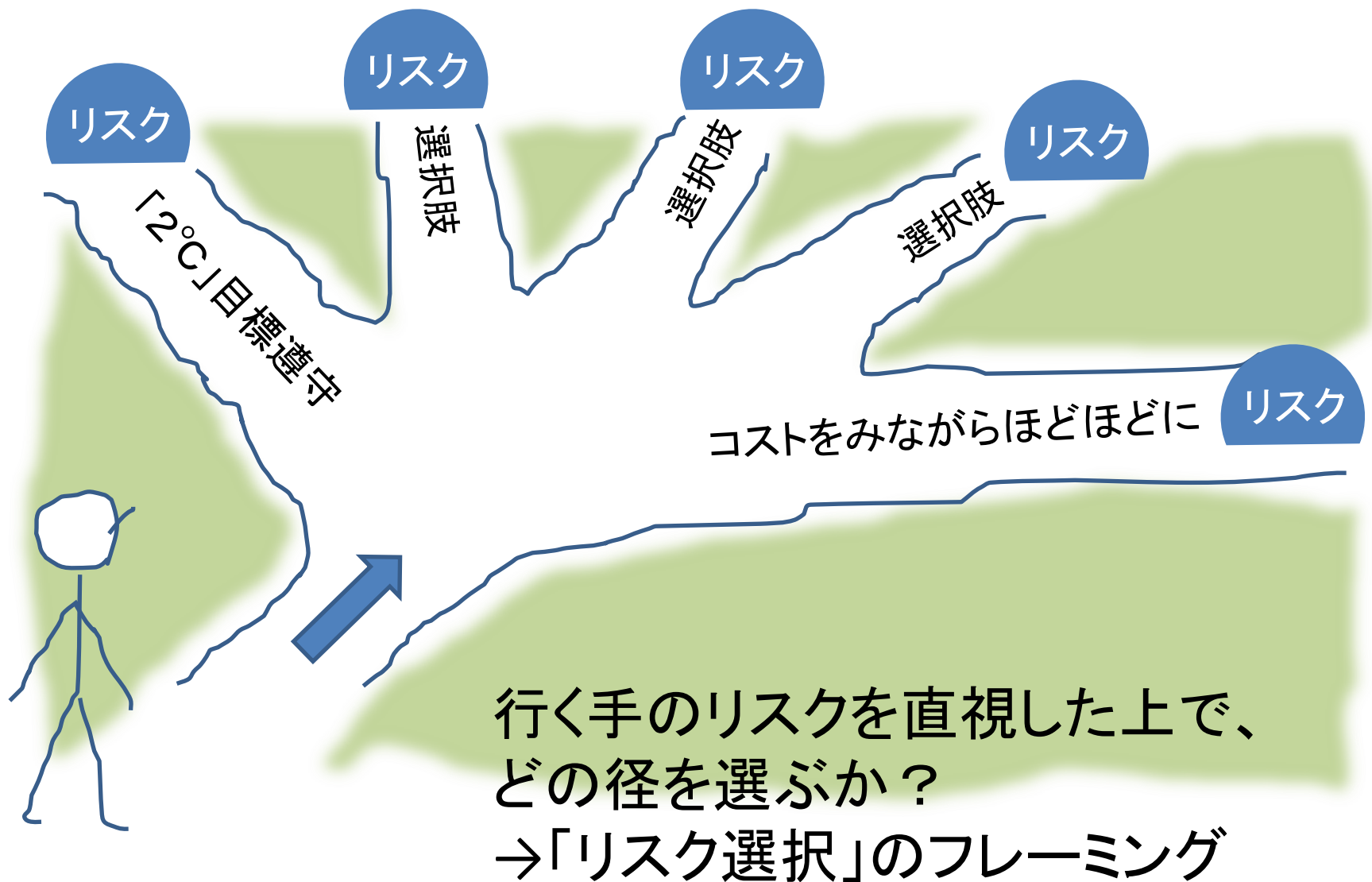
## 積極派の「2°C」のフレーミング

- 本当に「2°C」を超えてはいけないかという認識に依存
- 急進的な対策に伴うリスクを軽視しがち

## 慎重派の「経済価値」のフレーミング

- 「経済価値」の測り方、本当に「経済価値」を最大化すればよいかという認識に依存
- 深刻な気候変動影響が発現した場合のリスクを軽視しがち

# すべての行く手はリスクで塞がれている



# 誰がリスクを判断するのか

## テクノクラシー支持

- 知識を持ったエリートが合理的に判断
- 「市民の意見は感情的で非合理的だから反映すべきでない」と考えがち

## デモクラシー支持

- 主権を持った市民が民主的に判断
- 「エリートは自分の利権やメンツを優先するので判断を任せるべきでない」と考えがち

# 専門家が単純に「正解」を 供給できなくなってきた

- 英国BSE問題(1996)  
BSEの人への感染→専門家不信  
「欠如モデル」から「対話モデル」へ
- イタリア ラクイラの地震(2009)  
専門家の委員会を過失致死で起訴
- 日本 福島第一原発事故(2011)  
「原子カムラ」の「安全神話」批判  
低線量被ばく論争

# リスク問題を社会に開くメリット

- 専門家だけでは気が付かない、さまざまな心配、利害関係、問題の捉え方によりフレーミングを広げたり、見直したりできる。
- 専門家による暗黙の相場観、価値判断に依存する部分を外部から指摘し、光を当てることができる。
- 問題に長く付き合ってきたコミュニティは「ローカル知」を持っている場合がある。

cf. “extended peer community” (Post-Normal Science)

# 「賭け」の判断と「責任」

低確率大被害リスクは、「賭け」の要素が大きい。どんなに可能性が低くても、起きるときには起きる。期待値に基づいた「合理的な」判断が、結果的に失敗になることがある。

「責任」=自分が行為を自由に選択できる状況にあって、どの行為を選んだらどうなるかが自分なりにわかっていて、その上で自分の判断でどれかの行為を選択した場合に、生じるもの。

特に、「賭け」の判断に「責任」が生じるという認識が重要ではないか。

# パターンナリズム vs インフォームド・コンセント

- 「合理的」とされる専門家の判断には、専門家の相場観、価値判断、動機が影響している可能性がある。
- 「賭け」の判断の「責任」を専門家のみが負うのは不適切ではないか。
- 専門家の判断の押しつけ(パターンナリズム)でなく、社会の自己決定権の尊重(インフォームド・コンセント)が望ましいのでは。
- ただし、十分なインフォームド・コンセントのプロセスを尽くすことは、実際には難しい。

# インフォームド・コンセントに近づく ために

- 専門家の知識と社会の価値判断を融合し、それを政治的な意思決定に届けるプロセスが必要。
- 十分ではないが、いくつかの試みがある。
  - WWViews(世界市民会議)
  - 討論型世論調査(2012年に日本でエネルギーの選択肢の議論に採用された)
  - 英国2050 pathways calculator(ウェブ上のツール)



# 専門家や行政への「信頼」について

市民への意見聴取が「ガス抜き」にならないために必要なこと:

- 必要な情報を誰でも入手可能にする
- 情報の作成過程や前提条件を明らかにする
- 誰でも意見を表明できるようにする
- 集まった意見を公開する
- 集まった意見をどのように参考にしたかを説明する

→このようなプロセスにより、「信頼」は少しずつ積みあがっていくのでは。