

公開国際シンポジウム  
「温暖化予測の鍵、海のCO<sub>2</sub>」  
2009年3月3日(火), 14:00-16:30  
気象庁(講堂), 東京

# 海と地球温暖化 ～ IPCC報告書から

花輪 公雄  
(東北大学 大学院理学研究科)

この講演では、温暖化が起こる仕組み、IPCCの活動、第4次評価報告書の概要、地球温暖化における海洋の役割などについて、解説したい。

海洋政策研究財団海外交流事業

国際シンポジウム(通訳付)

入場無料  
事前申込不要

## 「温暖化予測の鍵、海のCO<sub>2</sub>」

平成21年3月3日(火) 14:00~16:30 (開場 13:30)

会場 気象庁 2F 講堂 (東京都千代田区大手町)

### —プログラム—



海と地球温暖化～IPCC 報告書から

東北大学大学院教授 花輪 公雄 博士



大気 CO<sub>2</sub> の海洋吸収と生態系への影響 (通訳付)

米国海洋大気庁 Christopher Sabine 博士



人為起源 CO<sub>2</sub> の海洋吸収シミュレーション(通訳付)

ブリンストン大学 Keith Rodgers 博士



海洋観測の国際連携と課題

気象庁地球環境・海洋部 北村 佳照 博士

会場への交通

東京メトロ「竹橋駅」4番出口から徒歩1分、  
東京メトロ・都営地下鉄「大手町駅」C1番出口から徒歩5分

お問合せ先

気象庁地球環境・海洋部海洋気象課 電話 03-3212-8341 内線 5150  
ホームページアドレス <http://www.jma.go.jp/>

## 話題提供の内容

はじめに ー気候とはー

1. 可視光線と赤外線
3. 温室効果の仕組みと温室効果気体
4. IPCC（気候変動に関する政府間パネル）について
5. IPCC 第1作業部会 第4次評価報告書 の概要
6. 地球温暖化と海洋

おわりに

# 気候, 気候変動, 気候変化, 地球温暖化とは?

**気候:** 長期平均したときの大気の状態

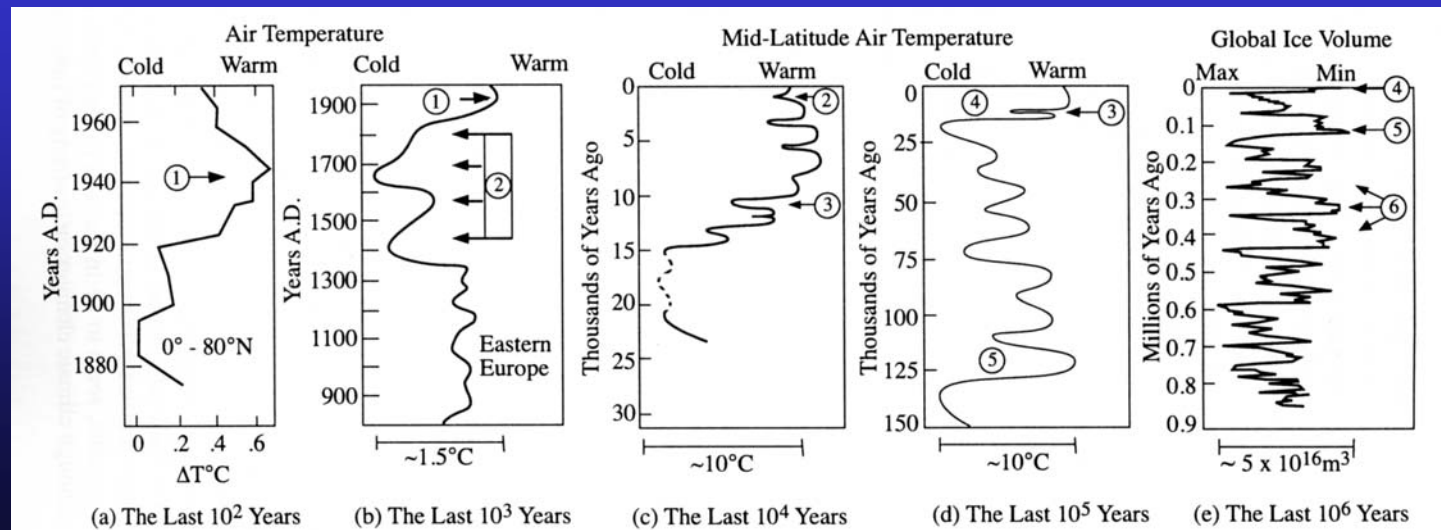
縄文時代の気候は温暖で, 江戸時代中期の気候は寒冷だった。

**平年値:** 過去30年間の平均値. 現在の平均値は, 1971年から2000年までの30年間. 10年ごとに更新. 次の更新は2011年.

**気候変動 (climate variation) と気候変化 (climate change):** 変動は振動的な現象に対し, 変化は一方向の現象に用いることが多い. 気候は絶えず揺らいでいる. (混在して使用されているのが現状.)

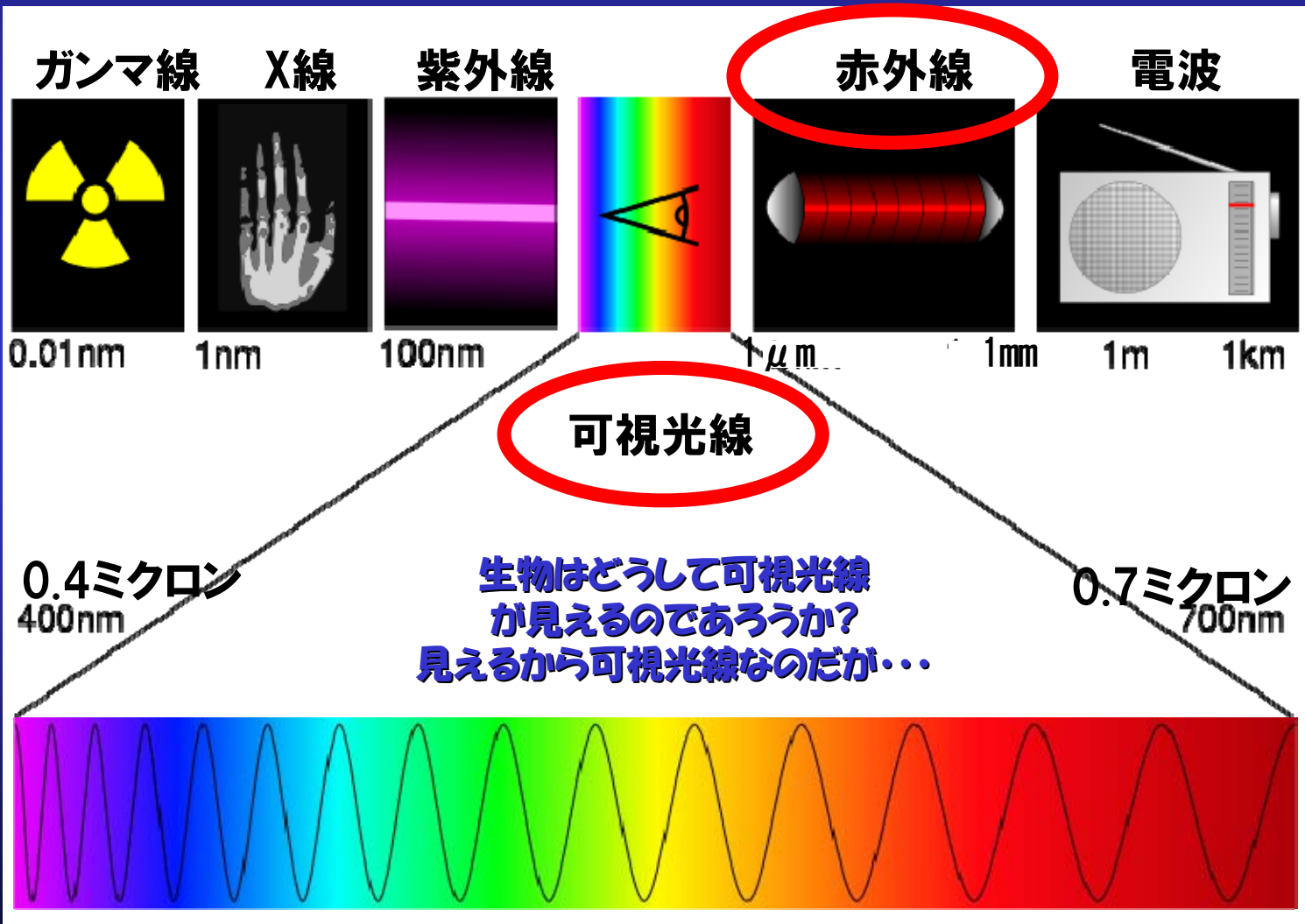
**地球温暖化 (global warming):** 「気候変化」の一つ. 具体的には, 地表面付近の気温が上昇する現象. 現在, 人類が抱えるもっとも大きな地球環境問題の一つ.

ところで,  
天気とは?  
天候とは?



# 可視光線と赤外線（電磁波の一種）

太陽が放射している可視光線や、地球が放射している赤外線は電磁波の一種。



生物はどうして可視光線  
が見えるのであろうか？  
見えるから可視光線なのだが...

## 赤外線で見ると何が見える？

- ・「サーモグラフィ (thermography)」なる計測装置がある。人体の温度などを計測する装置であるが、何を計っているのだろうか。
- ・雲画像は、夜でも雲の動きがわかる。どうして見えるのだろうか？

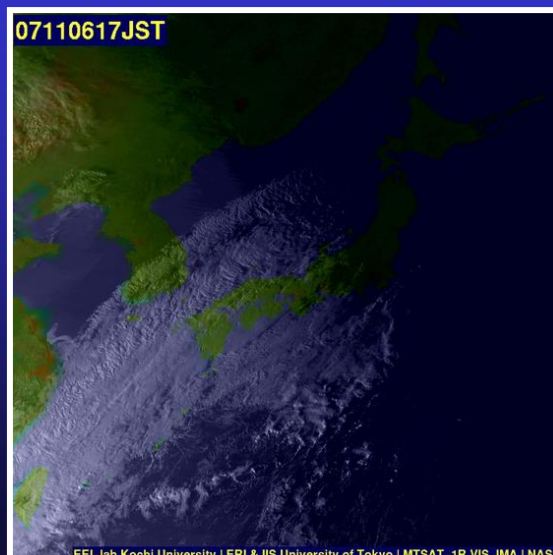
👉 「赤外線」で計測している！

サーモグラフィ画像

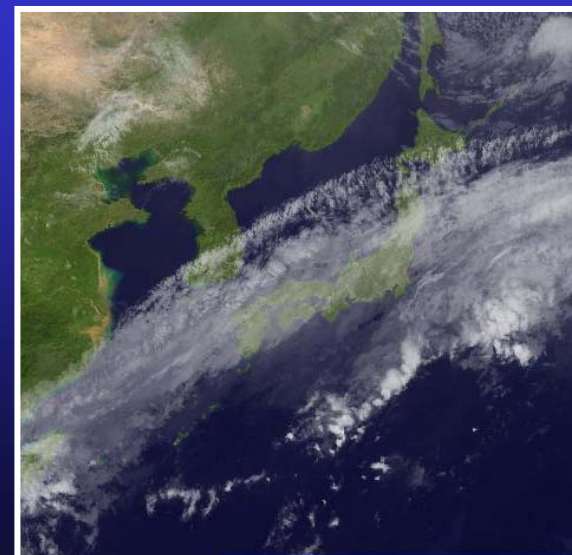


2007年11月6日17時  
(関東地方まで日が暮れた時刻)

可視画像  
(0.55-0.9  $\mu\text{m}$ )



赤外(雲)画像  
(10  $\mu\text{m}$ )



## 赤外線による分子の運動の励起

- ・ 気体分子に電磁波が当たると、気体分子の運動が激しくなることがある。気体の分子運動が激しくなることは、温度が上がること。
- ・ 分子運動が激しくなった気体は、再び四方八方へと赤外線を放射する。
- ・ このように赤外線に反応（応答）する気体を温室効果気体と呼ぶ。

## 地球大気中の温室効果気体

### <大気の組成>

窒素( $N_2$ , 78%), 酸素( $O_2$ , 21%), アルゴン(Ar, 1%). 以上で、大気の99.9%を占める。二酸化炭素は、0.038%程度(第4位)。(水蒸気 0.1~2%)

### <温室効果気体>

水蒸気( $H_2O$ ), 二酸化炭素( $CO_2$ ), メタン( $CH_4$ ), 一酸化二窒素( $N_2O$ ), 各種フロンガス, 対流圏オゾン( $O_3$ ), など。

# 温室効果が起こる仕組み

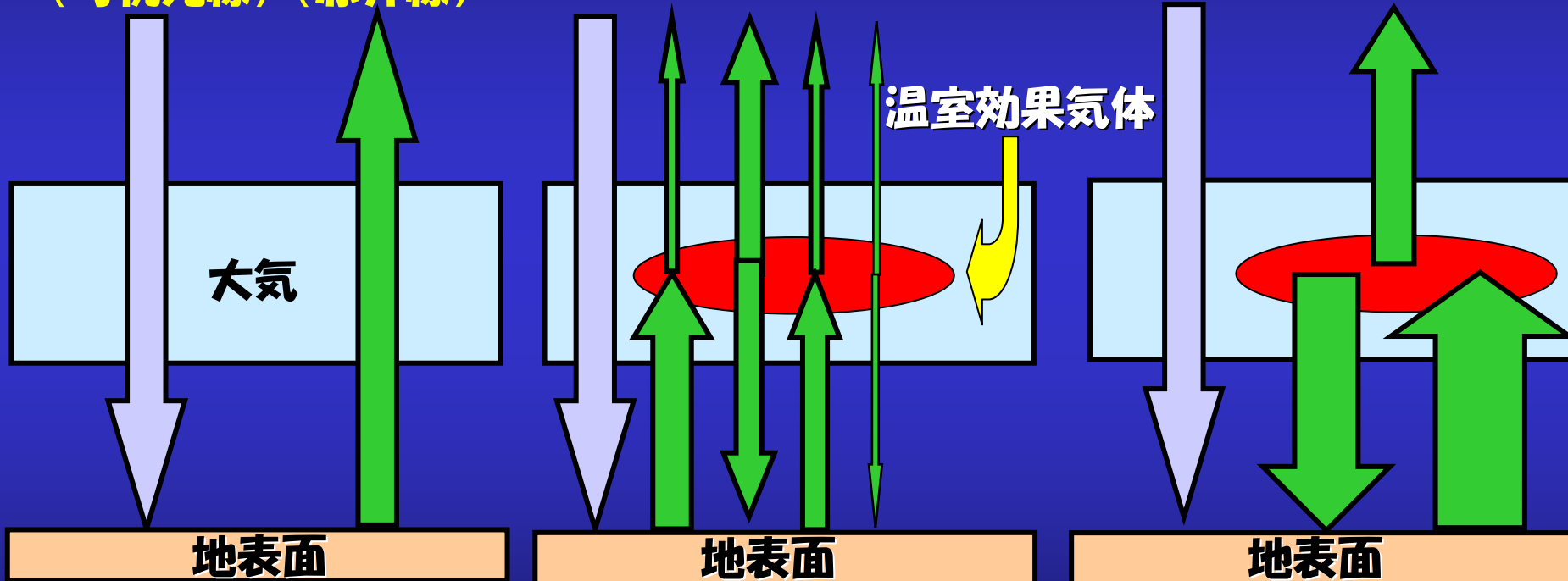
温室効果気体のないとき

温室効果気体のあるとき

プロセス説明の図

太陽放射 (可視光線) 地球放射 (赤外線)

太陽放射 地球放射



地表面温度は  $-19^{\circ}\text{C}$

地表面温度は  $+14^{\circ}\text{C}$

温室効果とは、大気中に含まれる温室効果気体が、地表面から出る赤外線を吸収し、再び四方八方に赤外線を放射することで、地表面気温が上昇すること。

## もし、温室効果気体が無ければ？

### 理論的に計算可能（放射平衡温度）

温室効果気体が無いとしたときの地球の表面温度：  
約  $-19^{\circ}\text{C}$ （約  $254\text{K}$ ）

温室効果気体ありとしたときの地球の表面温度：  
約  $14^{\circ}\text{C}$ （約  $287\text{K}$ ）

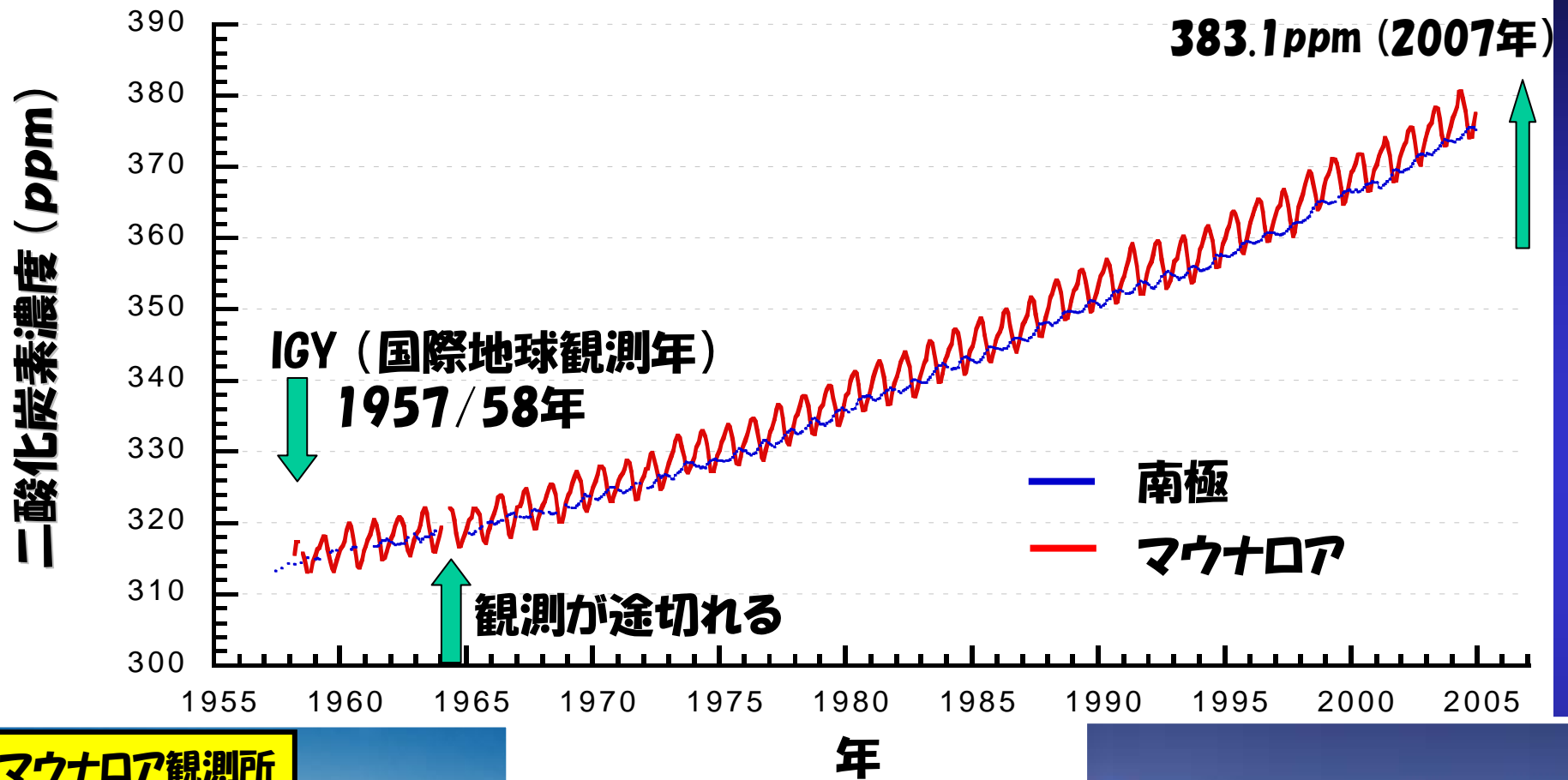
この差、約  $33^{\circ}\text{C}$  が、温室効果気体による気温上昇分。

温室効果は、現在の温暖な地球環境を作っていることは事実。

温室効果気体の増加は、地表面気温の上昇につながる。



# 観測された大気中の二酸化炭素濃度の変化



マウナロア観測所



ppmとは、  
百万分の一のこと

南極の観測所



# 過去1万年間の 主要温室効果気体濃度の変化

氷床コアの分析と、現代の観測による過去1万年間の温室効果気体の濃度変化。

19世紀後半以降（産業革命以降）の急激な濃度上昇。

二酸化炭素  
単位: ppm

メタン  
単位: ppb

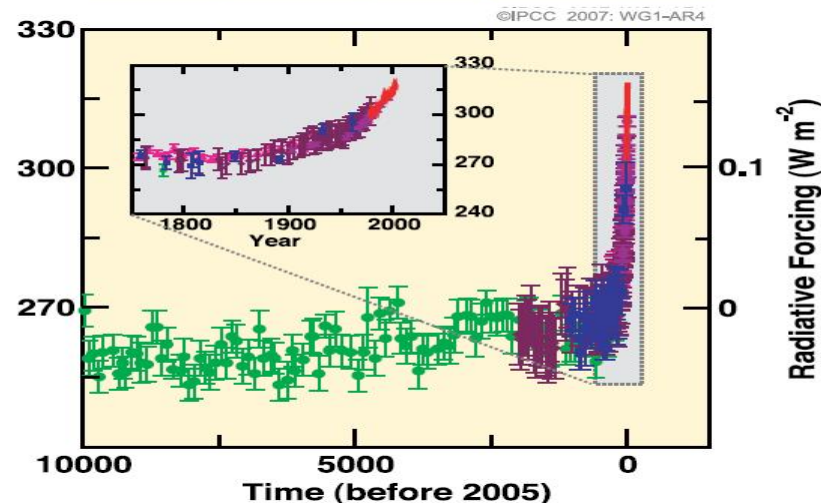
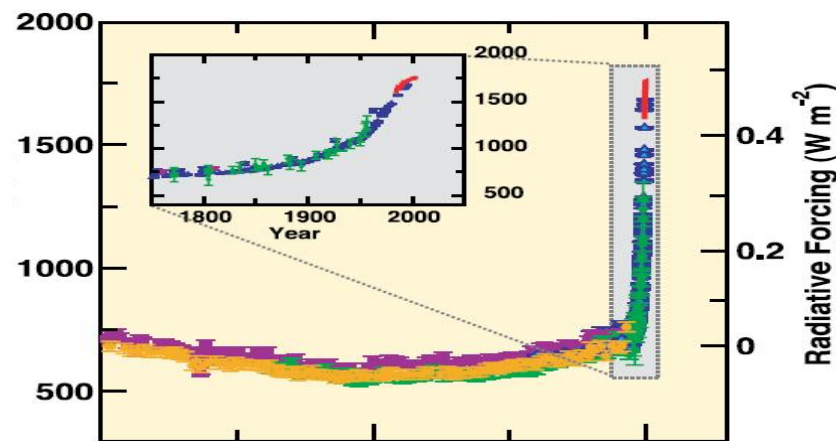
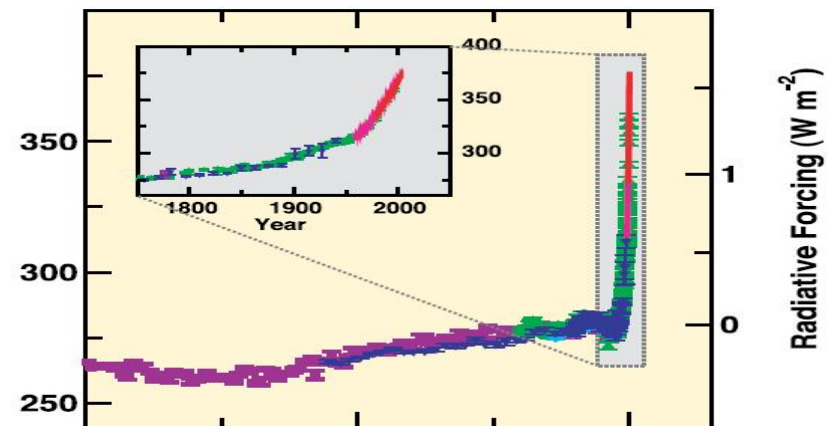
一酸化二窒素  
単位: ppb

< 単位について (体積) >

ppc: 百分の一: パーセント (%)

ppm: 百万分の一: 一万分の一%

ppb: 十億分の一

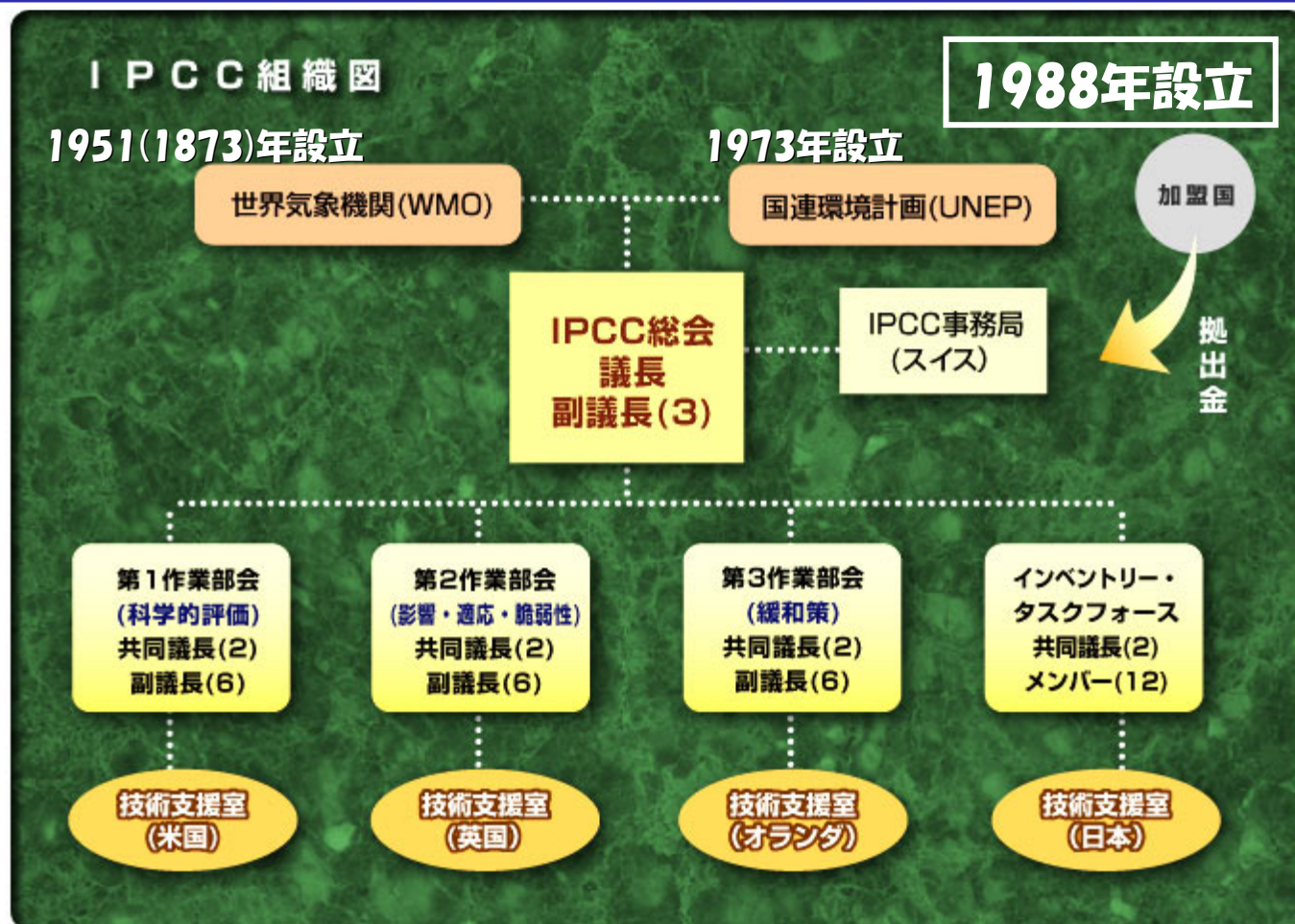


©IPCC 2007; WG1-AR4

# IPCC (気候変動に関する政府間パネル)とは

IPCC:「Intergovernmental Panel on Climate Change」

**任 務:** 二酸化炭素等の温室効果気体の増加に伴う地球温暖化の科学的・技術的、社会・経済的評価を行い、得られた知見を、政策決定者を始めとし、広く一般に利用してもらうこと。



WG1:

科学的評価

WG2:

影響・適応・脆弱性

WG3:

緩和策

インベントリー・タスク  
フォース:

各国の温室効果気  
体の排出量・吸収量  
の目録作成

文献をもとに評価  
するグループ

# IPCC評価報告書における地球温暖化に関する見解の遷移

5-6年ごとに「評価報告書 (Assessment Report)」を作成. 今回で4回目.

## 第1次評価報告書 (1990)

観測された気温上昇は, 主に自然的要因に起因している可能性もある.

## 第2次評価報告書 (1995)

事実を比較検討した結果, 識別可能な人為的影響が地球全体の気候に現れていることが示唆される.

## 第3次評価報告書 (2001)

過去50年間に観測された温暖化の大部分は, 温室効果気体濃度の増加によるものであった可能性が高い.

## 第4次評価報告書 (2007)

人為起源の温室効果気体の増加により, 20世紀半ば以降の世界平均気温の上昇のほとんどがもたらされた可能性が非常に高い.

メディアでの表現: 地球温暖化は人為起源と断定/確信

# IPCC第4次評価報告書の特徴-1

観測結果に対する評価対象項目の増加  
(研究の著しい進展による)

< 例 >

第3次評価報告書では、

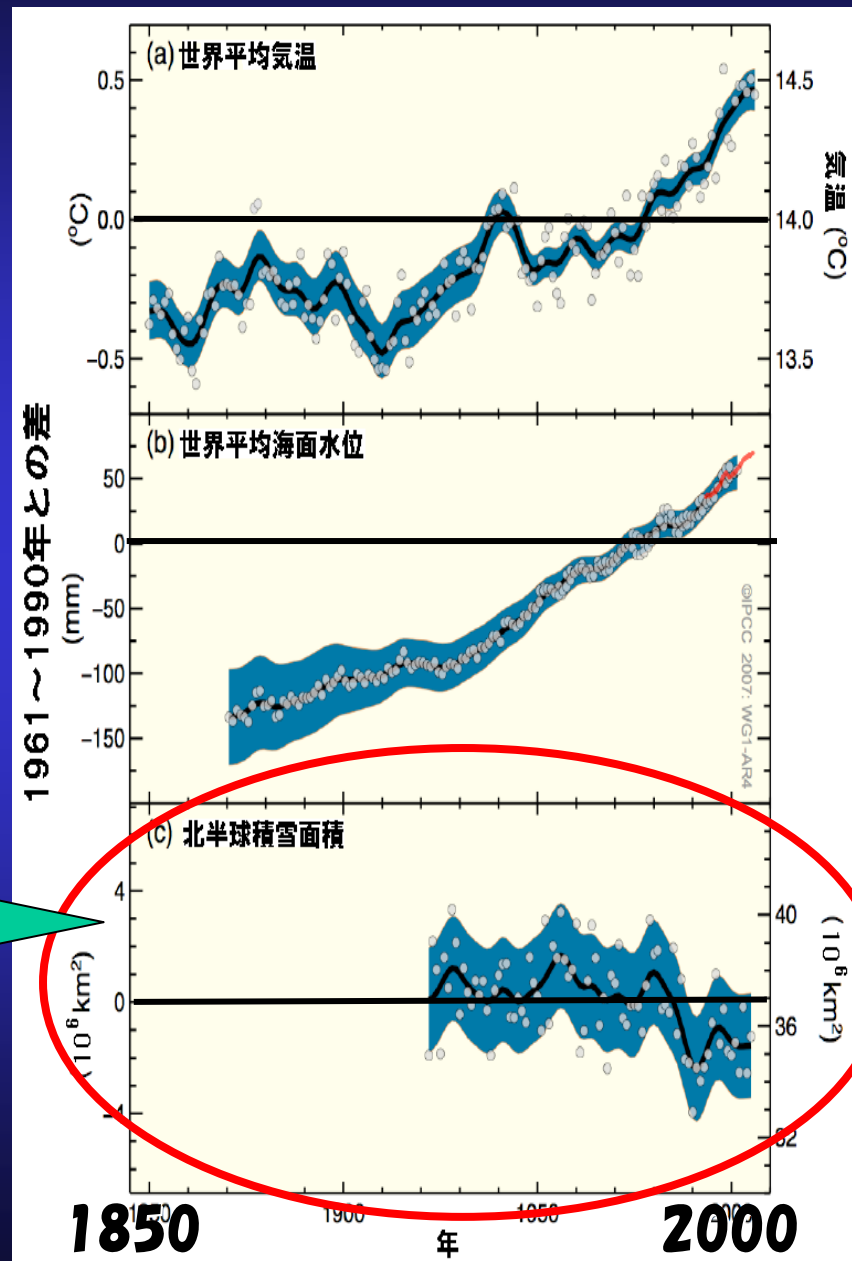
第2章: 観測された気候の変動と変化  
の1章.

第4次評価報告書では、

第3章: 観測: 地表面と大気の気候変化  
第4章: 観測: 雪氷と凍土の変化  
第5章: 観測: 海洋の気候変化と水位  
と3章に分割.

今回初めて記載

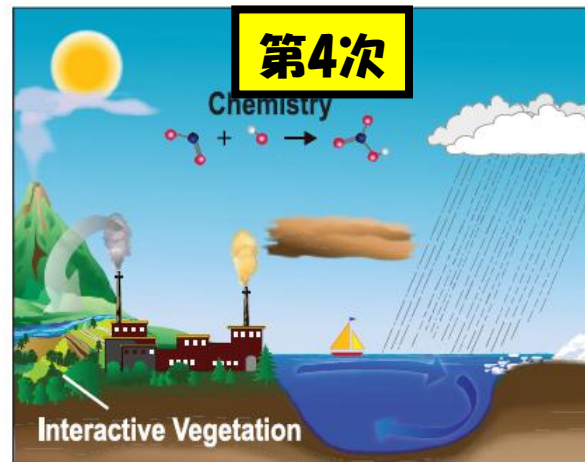
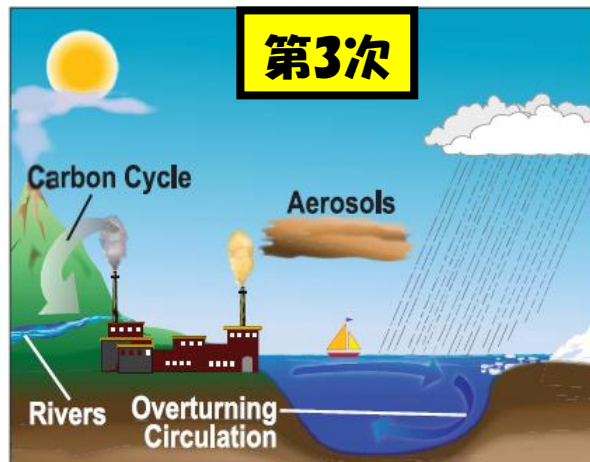
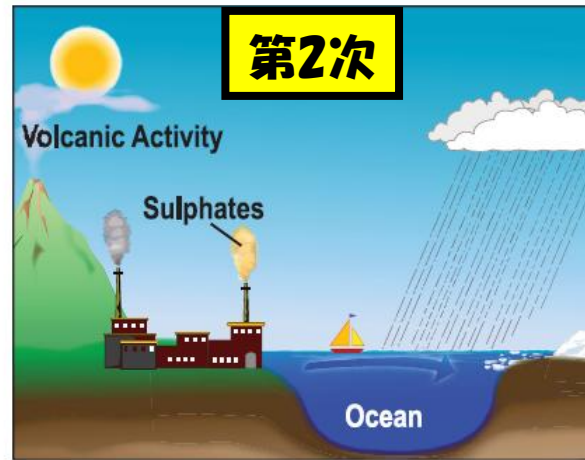
過去150年間の気温,  
水位, 雪氷面積の変化



# IPCC第4次評価報告書の特徴-2

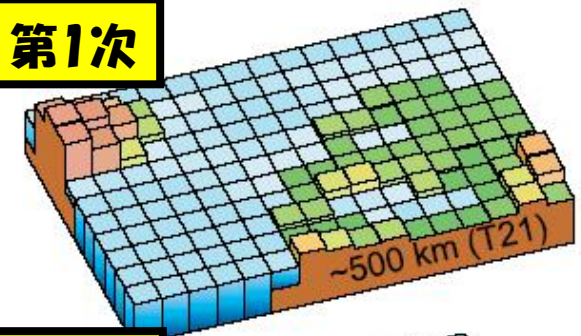
数値モデルの精密化 (計算機の高性能化)  
予測精度の向上. 多くの計算例

## 扱っている過程の精密化

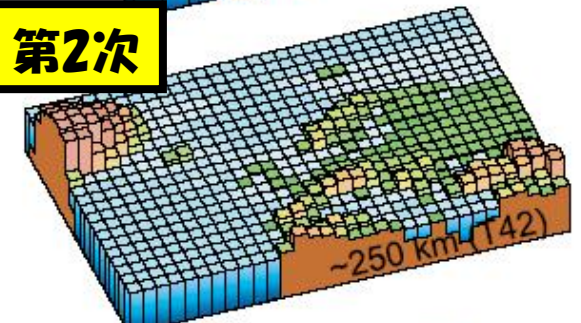


## 扱っている地形の精密化

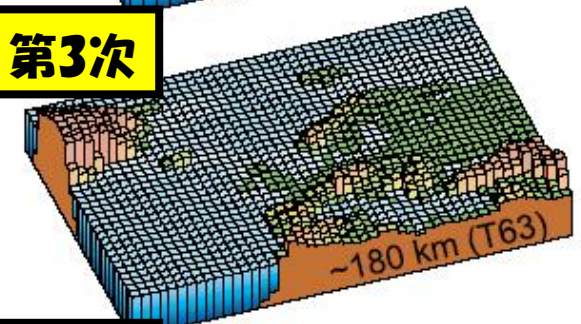
**第1次**



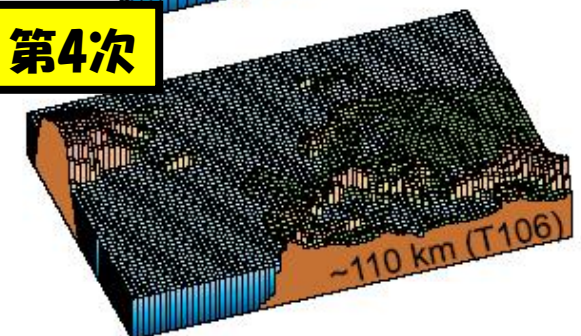
**第2次**



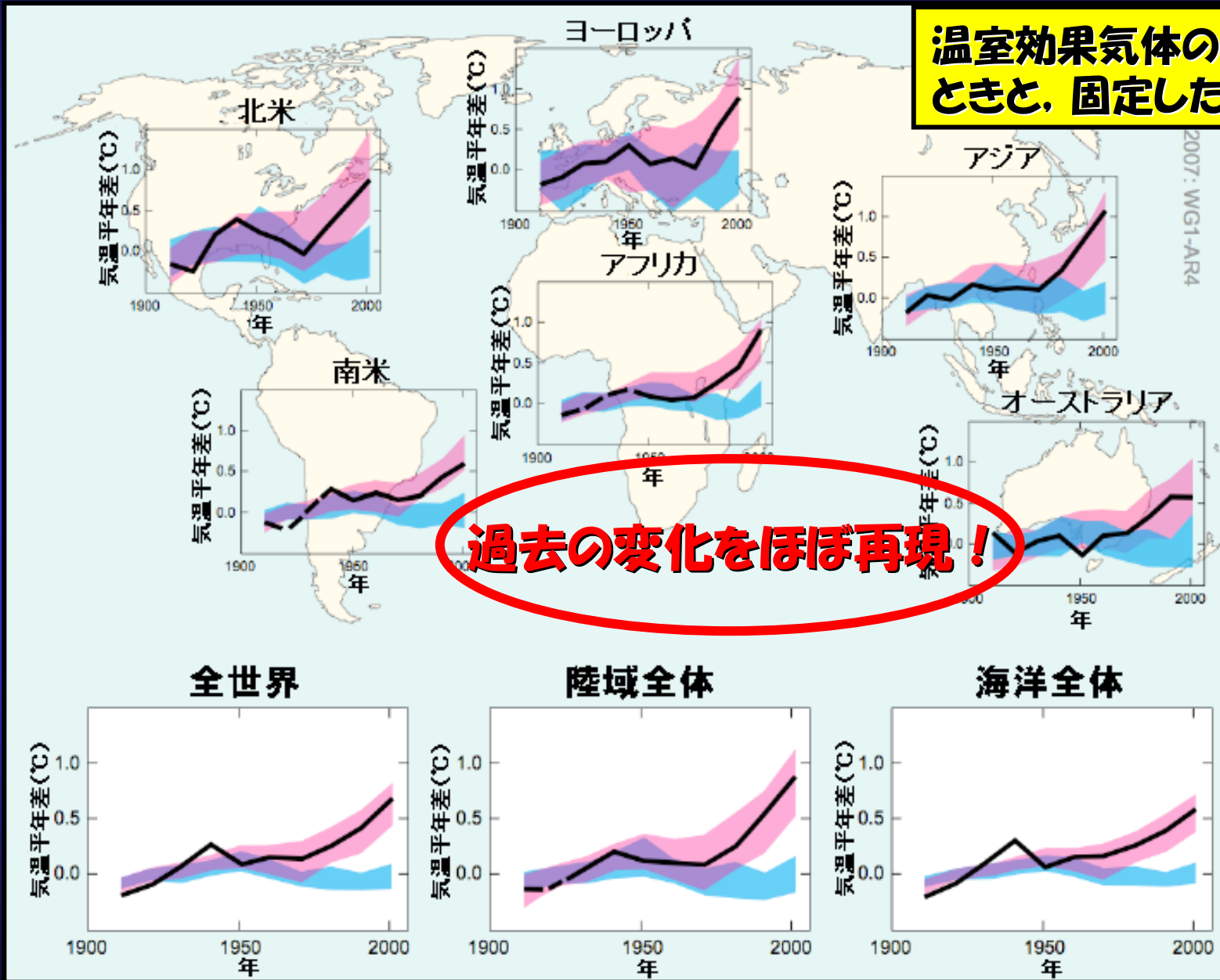
**第3次**



**第4次**



# 数値モデルで再現された過去の気温変化



温室効果気体の変動を入れたときと、固定したときとの比較

過去の变化をほぼ再現!

黒線  
観測値  
赤の帯  
温室効果  
気体:変動  
青の帯  
温室効果  
気体:固定

# 数値モデルによる将来予測に用いられるシナリオ

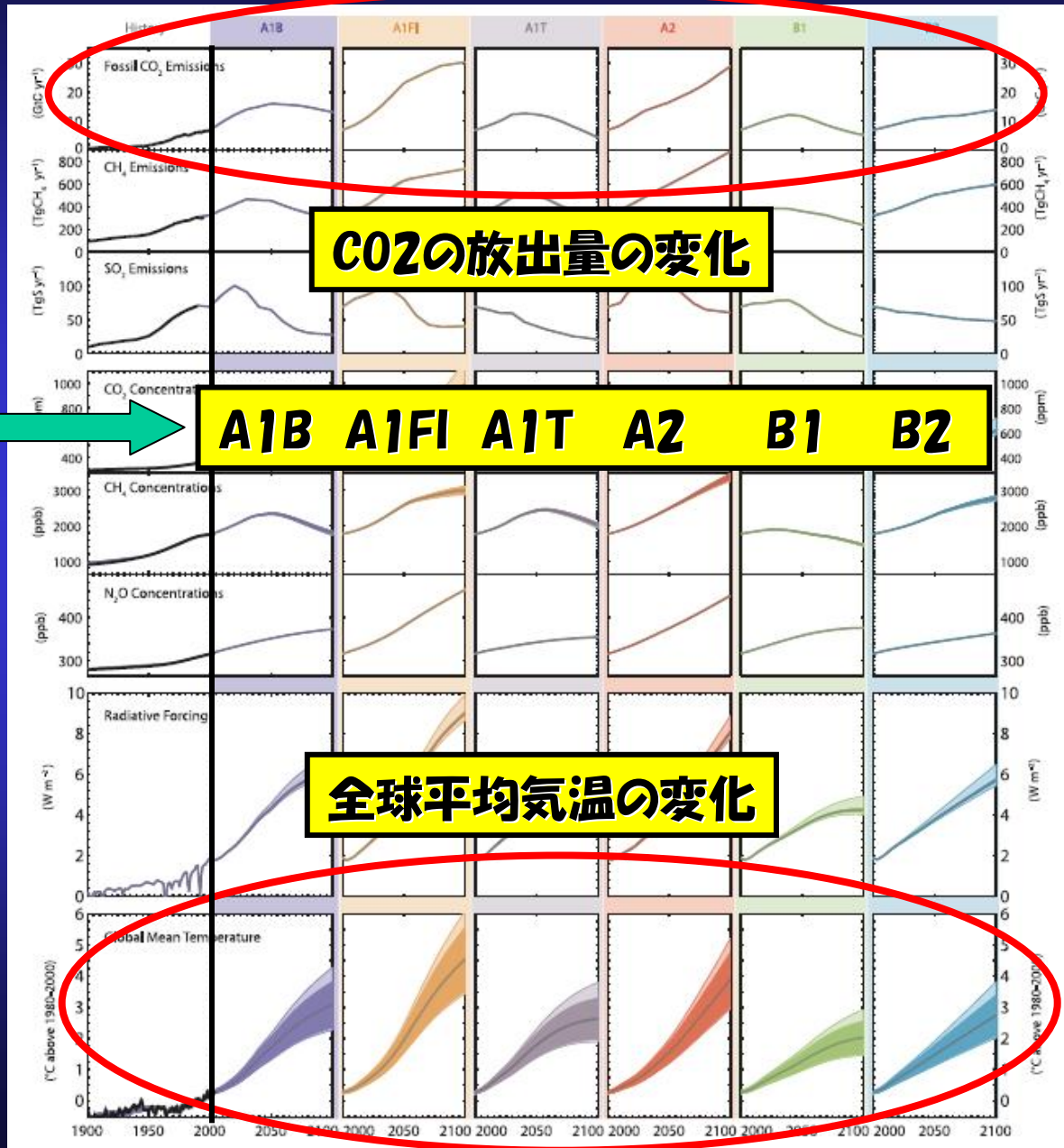
私たちの今後の努力により、温室効果気体の濃度変化は制御可能。しかし、将来、どのような変化になるのか不明であるので、幾つか（6つ）のシナリオで計算。

シナリオの名称 →

**A1B A1FI A1T A2 B1 B2**

経済を重視するかどうか、技術の進展が急速かどうかなどに依存。

温暖化の程度（気温上昇の程度）もシナリオで大きな差。



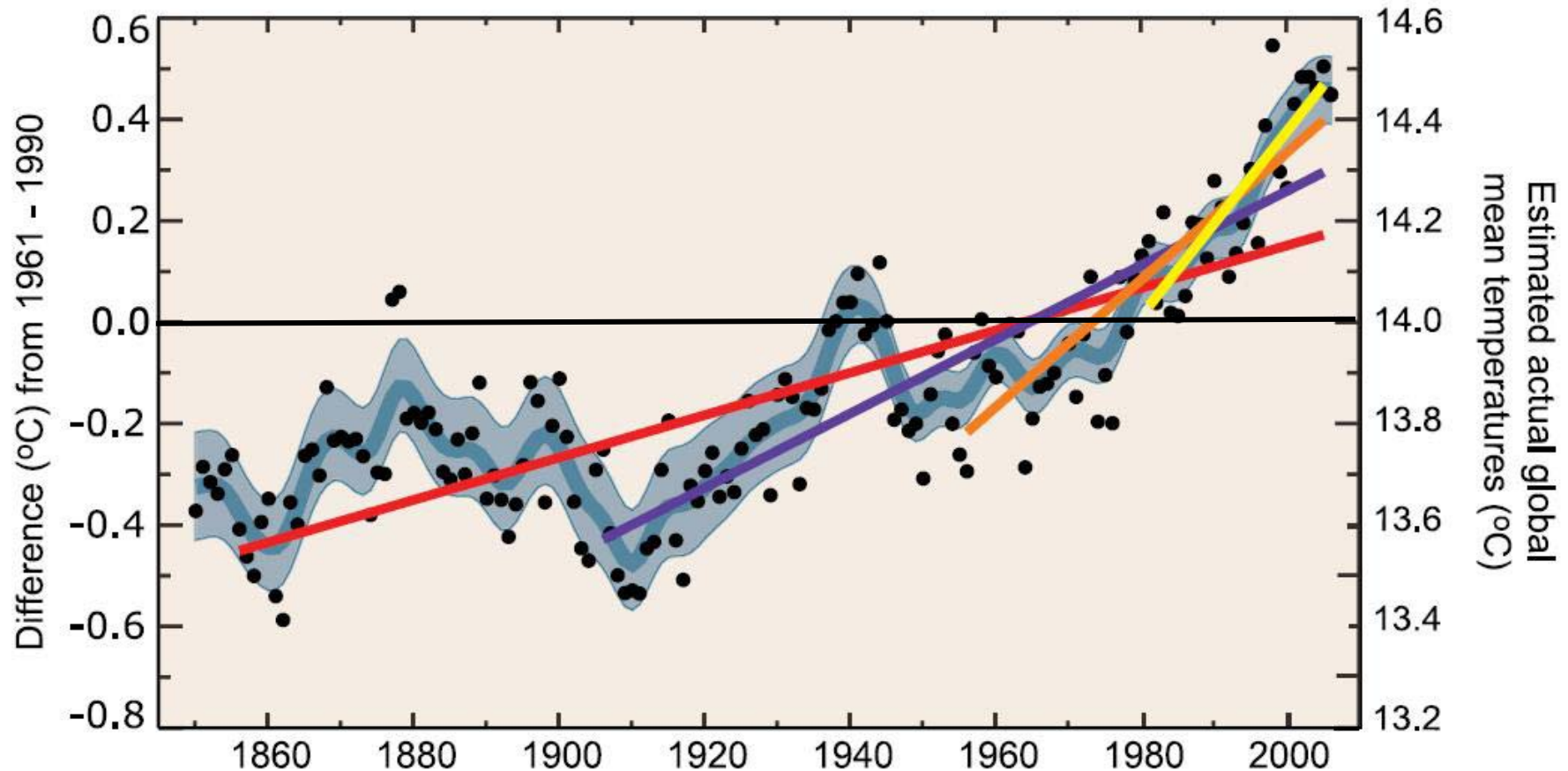


# 気象に関する現状分析と将来予測-気温

## [現状分析]

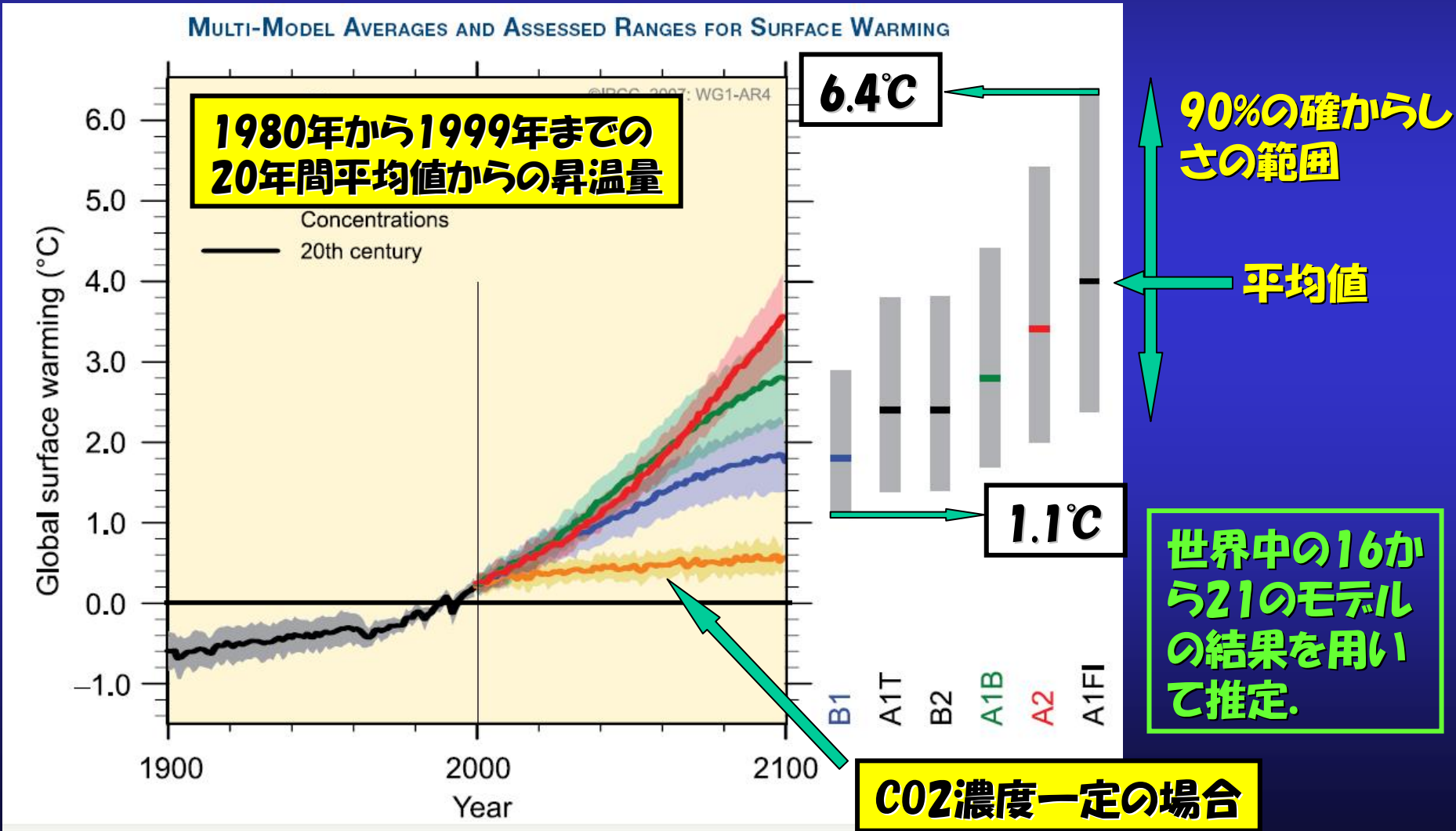
- ・ 最近12年間のうちの11年間は、1850年以降もっとも高温な12年の中に入る。
- ・ 最近の50年間の昇温傾向は、過去100年間の傾向の2倍。(温暖化の加速)

## 温度計観測にもとづいた1850年以降の全球平均気温の変化



# 気象に関する現状分析と将来予測 - 気温

**[将来予測]** 気温上昇は、どのようなシナリオでも、今後20年間は、10年あたり約  $0.2^{\circ}\text{C}$  程度の昇温が予測される。(2000年に固定したら  $0.1^{\circ}\text{C}$  程度)



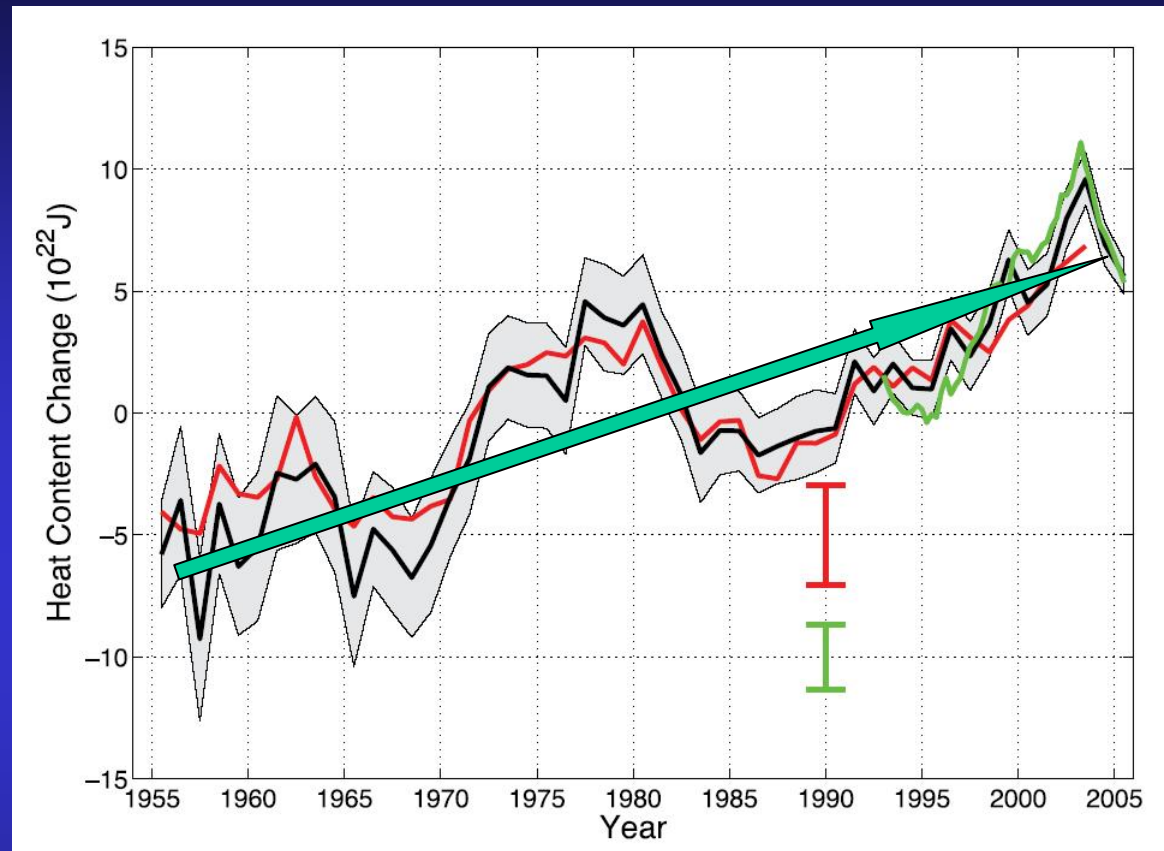
# 海洋に関する現状分析と将来予測 - 貯熱量

## <水温と塩分>

### [現状分析]

- ・ 少なくとも水深3000m深までの全海洋の平均水温は上昇している。
- ・ 地球がこの間貯えた熱の80%は海洋が吸収している。
- ・ 塩分は、中・高緯度において減少し、低緯度において上昇している。

これまで地球が貯えた熱量の80%は、海洋に存在。



## 海面から700M深までの貯熱量の変化

海面から3000m深まで平均した水温の上昇量は、 $0.037^{\circ}\text{C}$ 。仮に、増加した貯熱量で大気を暖めると、約  $21^{\circ}\text{C}$  も上昇する。

# 海洋に関する現状分析と 将来予測-水位

## <水位>

### [現状分析]

- ・ 20世紀期間中に水位は、全  
球平均で17cm上昇。
- ・ 過去50年間の平均上昇率は  
1.8mm/年、ここ10年間では、  
3.1mm/年。

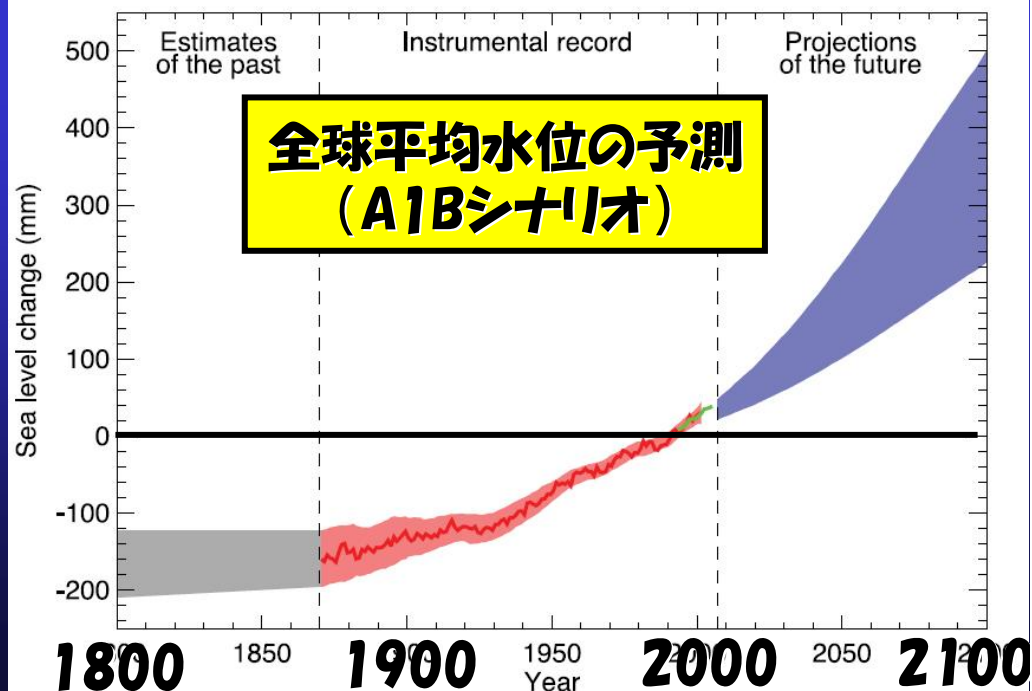
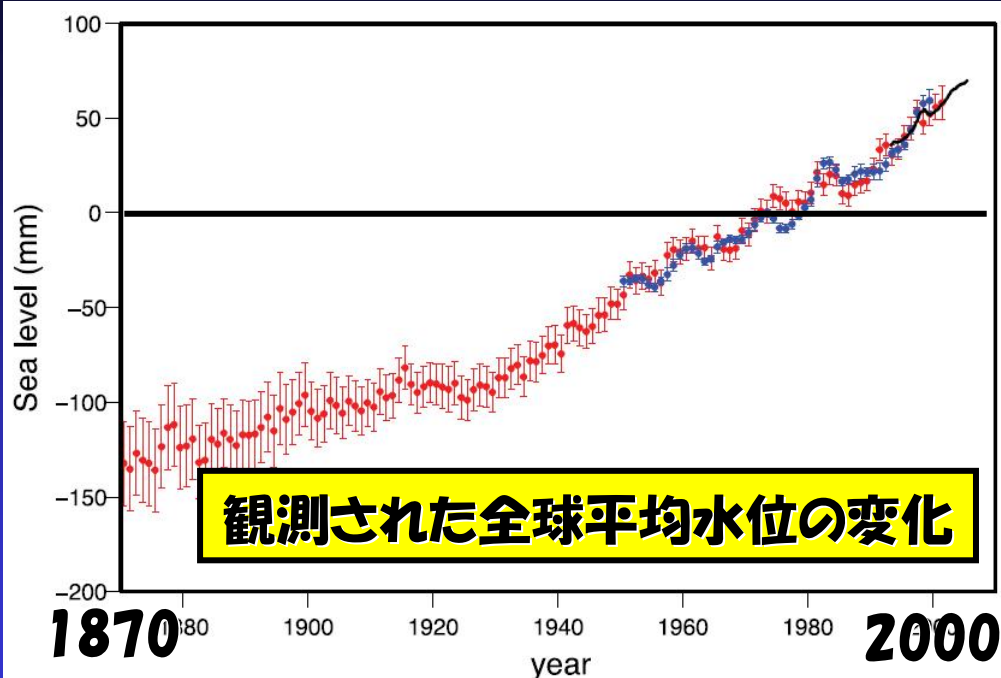
### [将来予測]

- ・ 6つのシナリオに対し、今後  
100年間で、18 cmから 59  
cm、上昇すると予測される。

注：急速な氷床の海洋流出に関す  
る知見が不十分。現在は熱膨張が主。



平均海拔高  
度1.5mの国、  
ツバル(人口  
は約1万人)

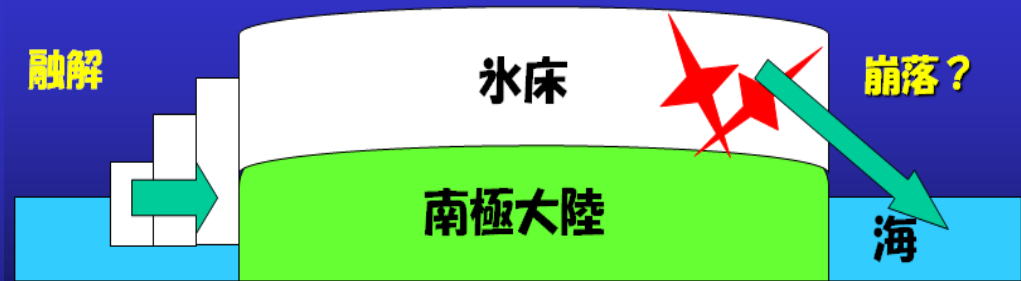


# IPCC: 海面水位に関する今世紀末までの将来予測

## 6つのシナリオに対する気温と海面水位の予測結果

	海面水位上昇 (1980-1999 と 2090-2099 の差 (m))
シナリオ	モデルによる予測幅 (急速な氷の流れの力学的な変化を除く)
2000年の濃度 で一定 <sup>b</sup>	資料なし
B1シナリオ	0.18-0.38
A1Tシナリオ	0.20-0.45
B2シナリオ	0.20-0.43
A1Bシナリオ	0.21-0.48
A2シナリオ	0.23-0.51
A1FIシナリオ	0.26-0.59

南極大陸は1000m程度の高さの大陸に、2000m程度の厚さの氷床が乗っている。温暖化にともない氷床の崩落が起こるかどうかは、現在の知識では不明。グリーンランドの氷床についても同じ。



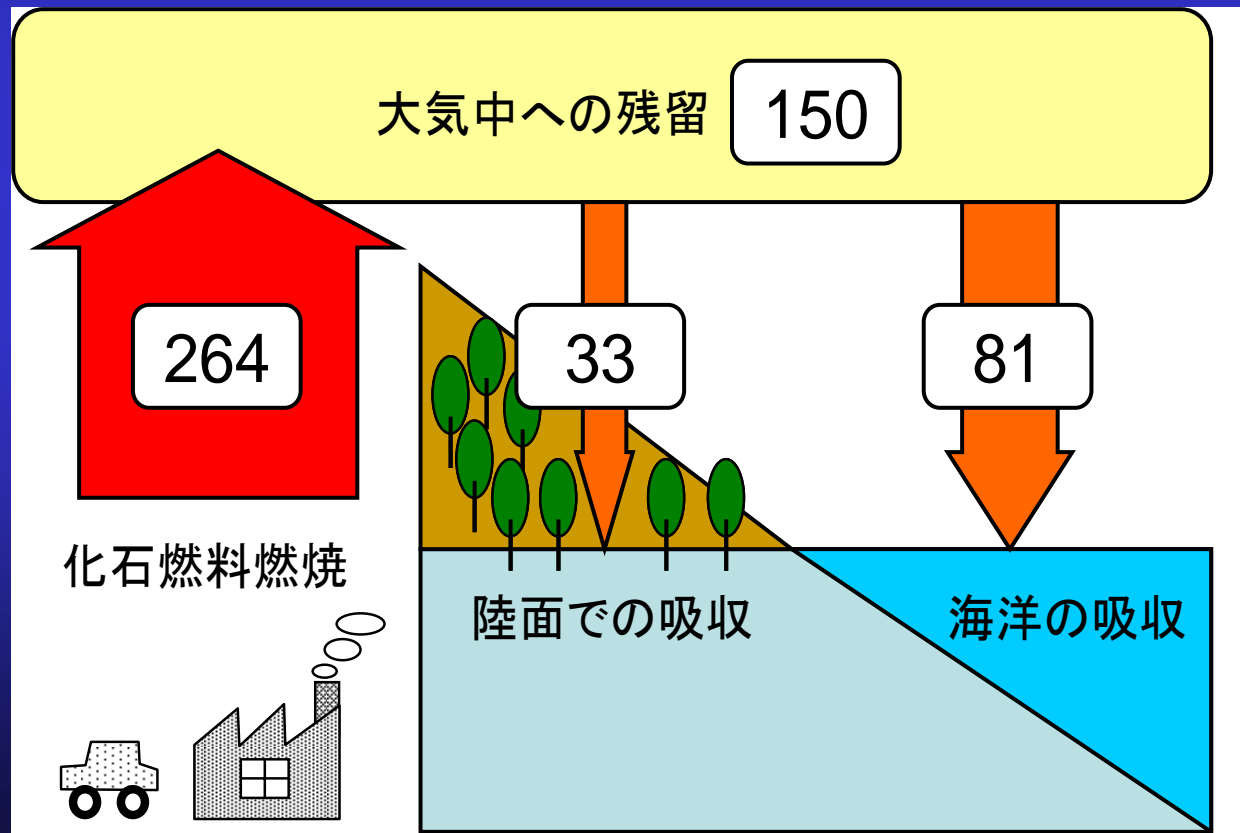
(注): 氷床の動きについての知見が不十分であるので、各シナリオに対して、上昇の範囲を示すに留まっている。

氷の動力学的振る舞いの研究の推進とともに、南極やグリーンランドの氷床に対する注意深い観察が重要!

## 海洋によるCO<sub>2</sub>の吸収

- ・ 海水は何でも溶かし込む。92種類の天然元素のほとんどが溶けている。
- ・ 温室効果気体も吸収している。現在の見積もりでは、人類が放出しているCO<sub>2</sub>の約30%を海が吸収、15%を生物が吸収、大気には55%が残留している。

人類活動によって大気中に排出されたCO<sub>2</sub>の分配(2000年から2005年の平均)。数字はCO<sub>2</sub>の重さ(単位: 億トン/年)。IPCCの評価による。



## 海洋に関する現状分析と将来予測 - 酸性化

### <海洋の酸性化>

#### [現状分析]

- ・ 海洋による  $\text{CO}_2$  の吸収のため、産業革命以前の海水の pH よりも現在の海水は、0.1 低下した。

#### [将来予測]

- ・ 大気中の  $\text{CO}_2$  濃度の増加により、海水の酸性化は進行する。21世紀中、0.14 から 0.35減少すると予測される。

この影響は、海水の酸性化が進むと、炭酸カルシウムなどの「殻」を持った生物（フランクtonやサンゴ）の生存が脅かされることになる。ひいては、魚なども含め、海洋生態系が大きく変化することが懸念される。

(注) pH (ペーハーあるいはピーエイチと発音)は、酸性度・アルカリ度を示す指標。pH が「7」であれば中性。現在の海水の pH は、8.1程度であり、弱アルカリ性。



円石藻 (ココリス)



翼足類 (クリオネ)

# 地球温暖化における海の役割のまとめ

## 1. 大きな海の熱容量

(海) 水は温まりにくく、冷めにくい。

海が大半の南半球の温暖化は、北半球に比べ遅れる。

→ 熱を吸収して、地球温暖化を遅らせている。

→ しかし、熱を吸収すると膨張し、水位は上昇する。

## 2. 温室効果気体の吸収 (海は何でも融かし込んでしまう)

海は  $\text{CO}_2$  の吸収している (約30%)。

→  $\text{CO}_2$  を吸収して、地球温暖化を遅らせている。

→ しかし、海の酸性化をもたらす、海洋生態系の破壊につながる。

## 3. 生物の存在 (海は多様な生物の宝庫)

「生物ポンプ」により、炭素を深海に急速に落としている。

→ 海の浅い層の炭素を急速に除去し、大気中の  $\text{CO}_2$  の吸収を促進する。

→ しかし、海洋生態系の破壊が進行すると、生物ポンプが現在のようには働かない。  $\text{CO}_2$  吸収量の減少をもたらす。



# IPCC – WG1 第4次評価報告書のまとめ

## <地球温暖化研究の現在>

### [ 観測・監視に基づく現状分析 ]

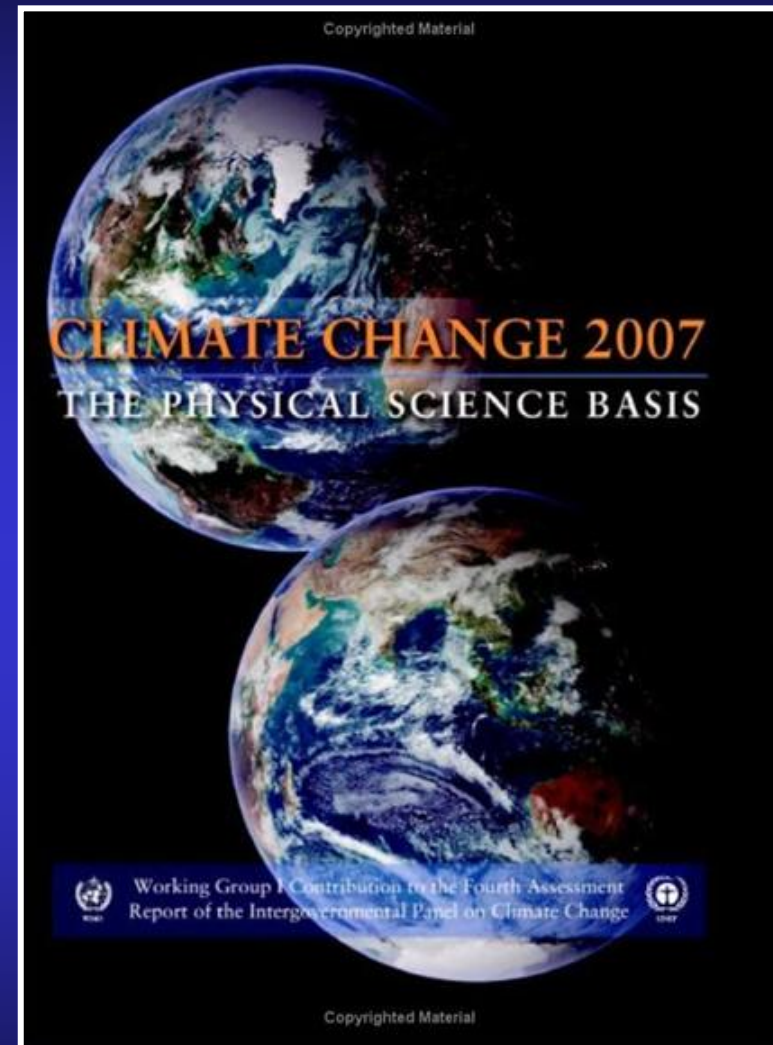
古気候の復元, 新たな観測,  
データ解析技術の向上

温暖化は加速的に進行

### [ 数値モデルによる将来予測 ]

問題点もあるが, モデルの精密  
化にともない予測精度は確実に  
向上

どのようなシナリオでも,  
今後数十年間は温暖化が進行



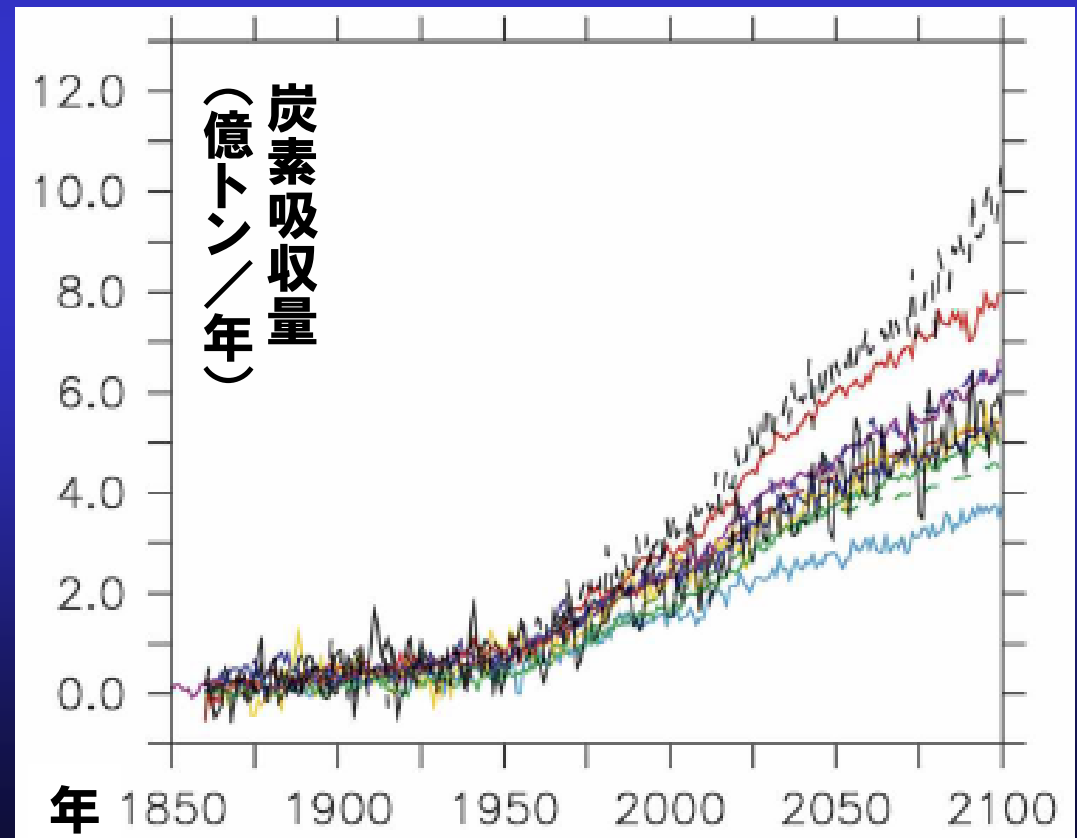
IPCC 第1作業部会 第4次評価報告書  
ケンブリッジ大学出版会, 2007年, 996ページ

## 地球温暖化の将来予測のさらなる精度向上のためには

現在の数値モデルによる地球温暖化の将来予測における問題点の一つは、海洋による  $\text{CO}_2$  吸収量の評価。

- \* 海洋による  $\text{CO}_2$  の吸収量は、大気と海洋の  $\text{CO}_2$  の分圧差と風速に依存。
- \* 海洋中の  $\text{CO}_2$  の分圧は、物理過程、化学過程、生物過程が複雑に関わって決まる。
- \* モデルごとにその取り扱いが異なるので、海洋が吸収する  $\text{CO}_2$  量も、モデルによって異なり、最終的に予測する気温の上昇量も異なる。
- \* 海の  $\text{CO}_2$  吸収の実態を観測すること、分圧がどのように決まっているかの研究が必要。

A2シナリオによる11の数値モデルの海による  $\text{CO}_2$  吸収量の変化



## おわりに —海洋の観測と監視の重要性—

- 海は地球温暖化において、重要な役割を担っている。
- 現在は、地球温暖化を抑制する働き。
- しかし、常に、負の効果が付きまとう（海水位上昇、酸性化）。
- 地球温暖化（気温上昇量）の正確な予測には、数値モデル内で海によるCO<sub>2</sub>吸収量を正確に表現する必要がある。
- 海の表層では「かき混ぜ」が弱化、中層や深層では表層からの海水のもぐりこみが減少、深海では水温上昇も観察されている。
- 海の酸性化も含め、私たちの見えないところで、静かに、しかし、確実に、「海の温暖化」は進行している。
- 私たちの地球の将来を、より正しく理解するためには、進行しつつある「海の温暖化」をしっかりと追いつけることが必要である。

**ご清聴、有り難うございました！**