気候変動予測とシミュレーションの現状

6/12/2009

(1)温暖化懐疑論･異論の背景は？

(2) 予測モデルの信頼性は向上したか？

(3) 気候モデルは費用大のため, 簡易モデルが便利

例:EUのモデル分析

(4) 温暖化への適応:夢の北極海航路の開拓

東京大学　生産技術研究所
エネルギー工学連携センター(CEE)
客員教授　丸山康樹

(1)温暖化懐疑論・異論の背景は？

YouTube画像
（080718）

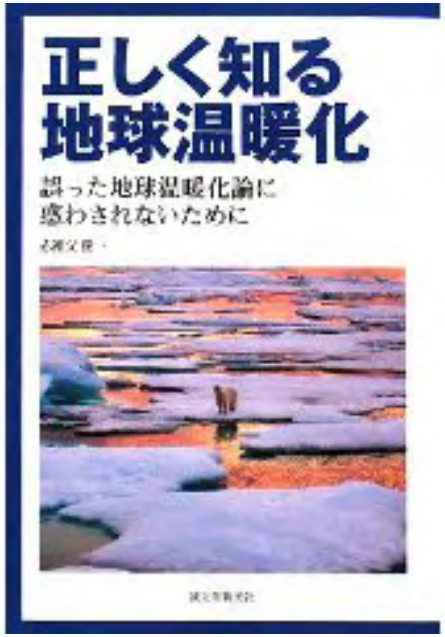
「地球温暖化詐欺」
The Global Warming
Swindleの主張：

地球温暖化は太陽活動が原因で、CO2ではない

ガイア理論、
ガイアの復讐

ロンボルクの懐疑論

現在太陽の活動が頭打ちの状態にあり、2050年には地球は寒冷化になるだろう。（丸山茂徳東工大教授）



もし、現在進行している温暖化の大部分が自然変動であるならば、温暖化による2100年まで気温上昇は1℃程度であろう。6℃ではない。（赤祖父俊一前アラスカ大学国際北極圏研究センター所長 ）

理由の1つ：気候変動の原因が複雑なこと

（政策、利害起因の理由は触れない）

【自然原因】

①太陽放射エネルギー（太陽活動）の変化

②地球の公転軌道変化（ミランコビッチサイクル）

③火山爆発（エアロゾルの寒冷化）

ただし、CO2放出の場合は温暖化→宮沢賢治「グスコーブドリ」

④数年～数十年、それ以上の自然変動

・ENSO等（エルニーニョ）：大気・海洋相互作用

・小氷期からの気候復元（1800年～）：海洋の応答遅れか？

【人為原因】

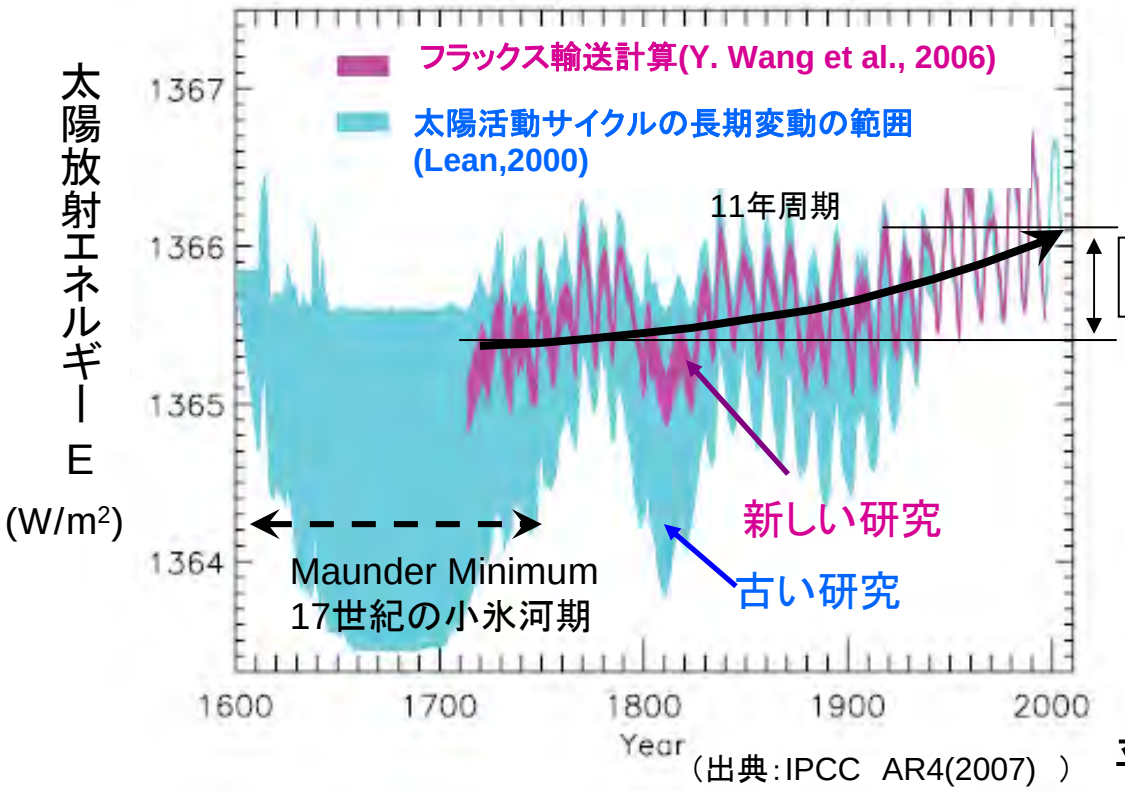
⑤CO_2、CH_4, HFC等の温室効果ガス

⑥森林伐採・砂漠化等の地表面変化

①太陽活動（太陽定数）の増加は僅か

最新成果ほど、1750年～2000年の太陽活動の変化は僅か

（→YouTubeの太陽活動説は誇張。しかし、2009年の太陽活動は弱いまま。？）

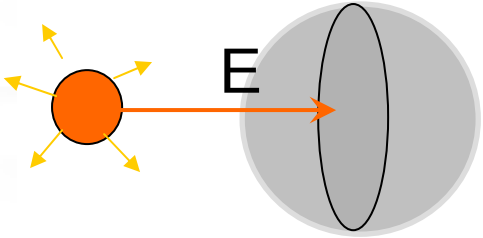


（出典：IPCC　AR4(2007)　）

地球表面積あたりの平均
太陽放射エネルギー：

1/4 ≒0.1 W/m²

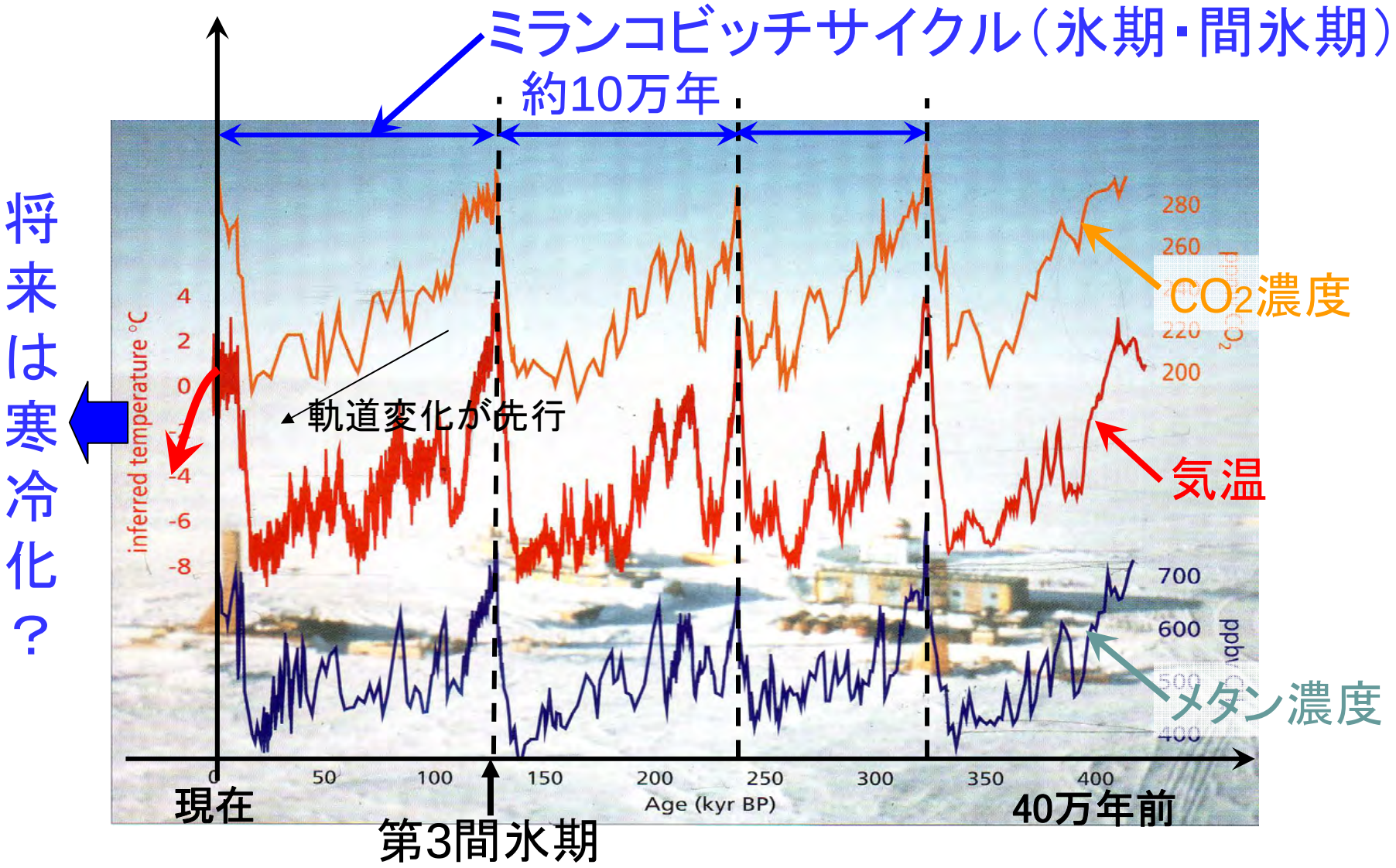
垂直断面当たり太陽放射エネルギー：E
地球表面積当たり太陽放射エネルギー：E/4



平均太陽放射エネルギー
＝太陽定数（E/4）＝342W/m²

（参考）温室効果ガスの温暖化効果：1.6 W/m²程度：
太陽活動（11年周期）は±0.2 W/m²程度

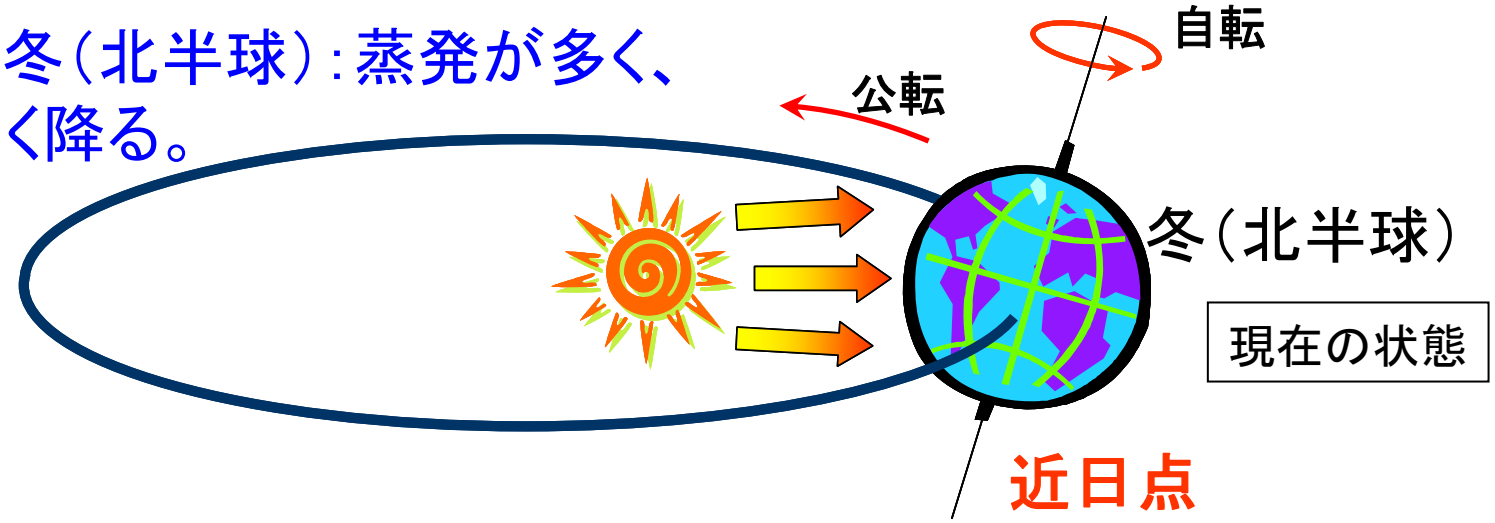
②地球軌道（楕円・円）の変化と氷期・間氷期

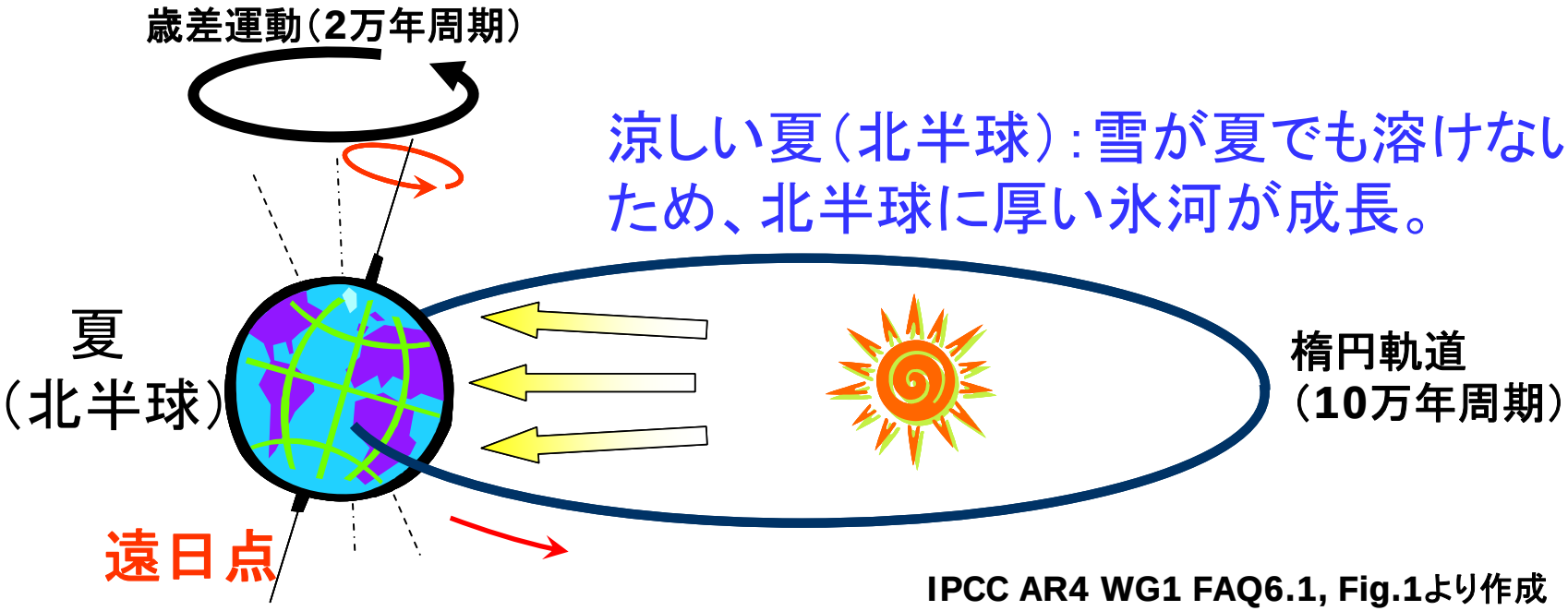


PAGES（1999）より作成

②楕円軌道と近日点（冬）の組合が氷河期の始まり

暖かい冬（北半球）：蒸発が多く、
雪が多く降る。



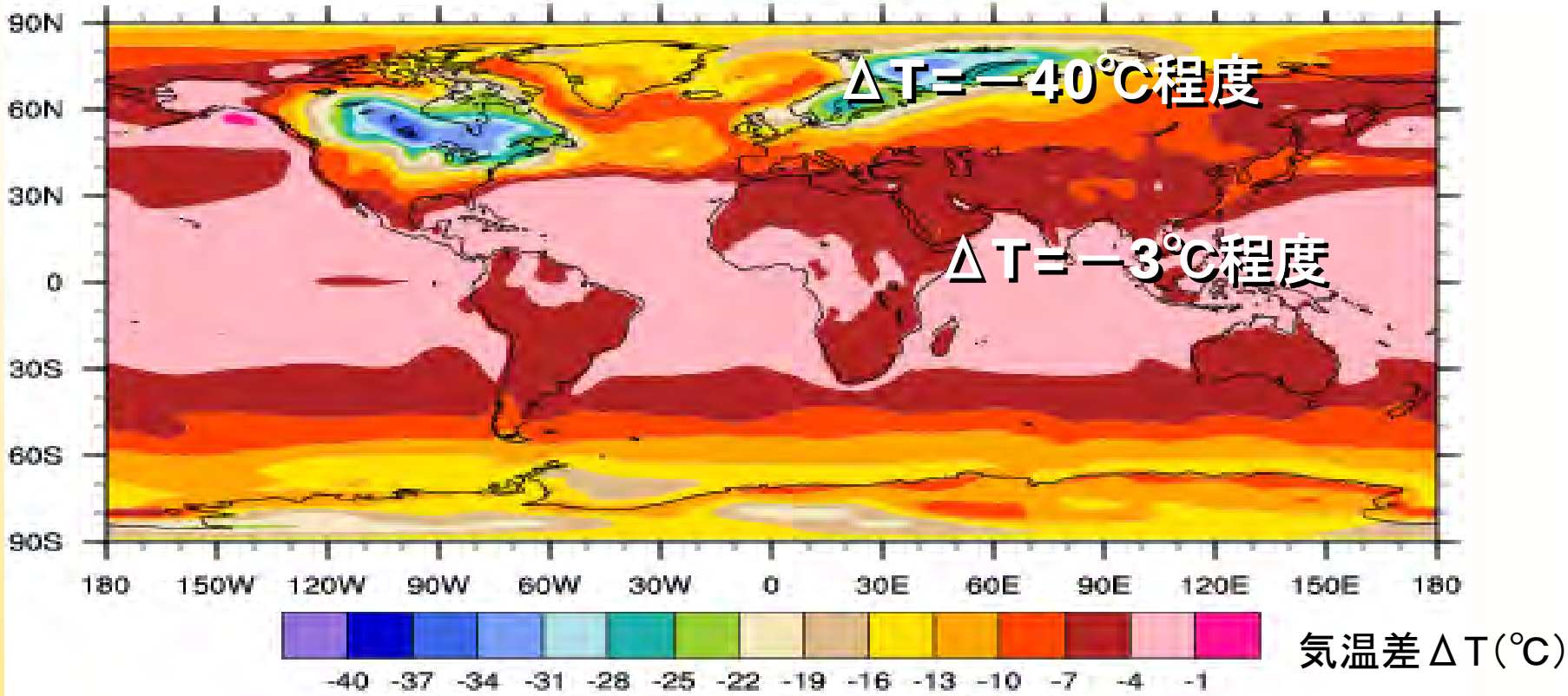


涼しい夏（北半球）：雪が夏でも溶けない
ため、北半球に厚い氷河が成長。

IPCC AR4 WG1 FAQ6.1, Fig.1より作成

氷河期(2万1千年前)でも赤道は暖かい

(出典)電中研再現結果



条件	年	CO2濃度	平均気温T	ΔT
現状	1990	355ppm	14.9℃	-
氷河期	2万1千年前	185ppm	8.5℃	－6.4℃

③火山爆発とエアロゾルによる一時的な寒冷化

成層圏のエアロゾル（火山爆発等）は
太陽エネルギーを反射（直接効果）

雲粒子増加等による太陽エネルギーの反射（間接効果）

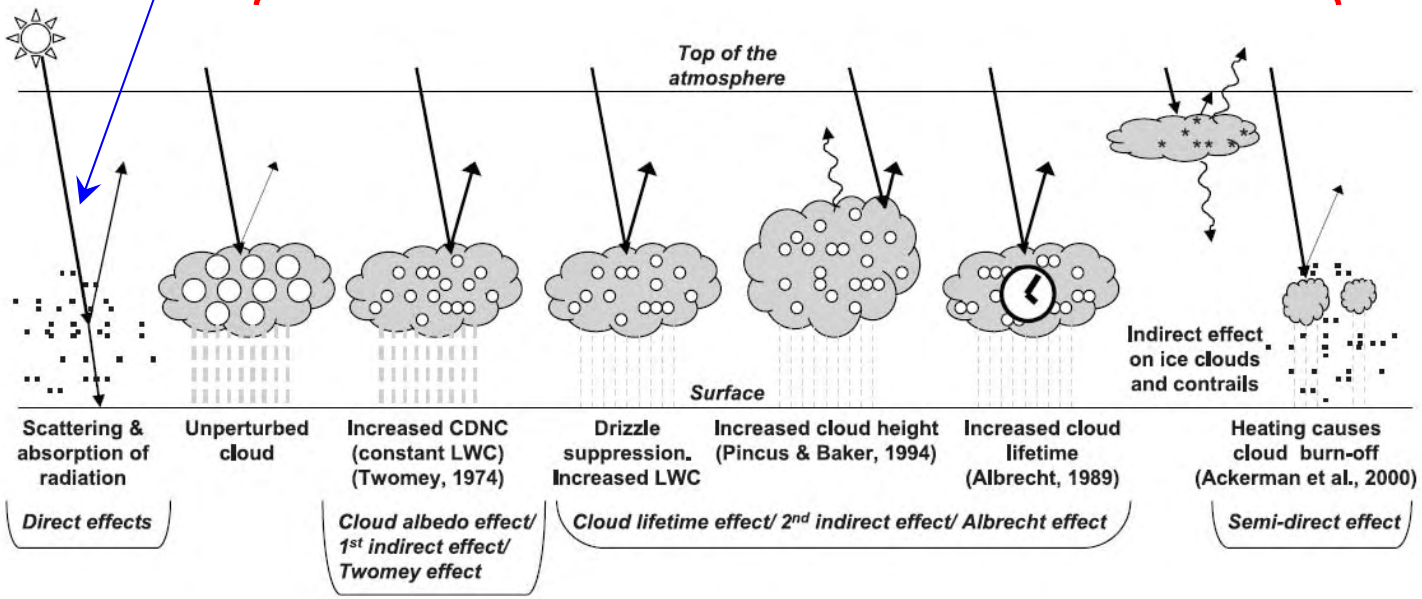
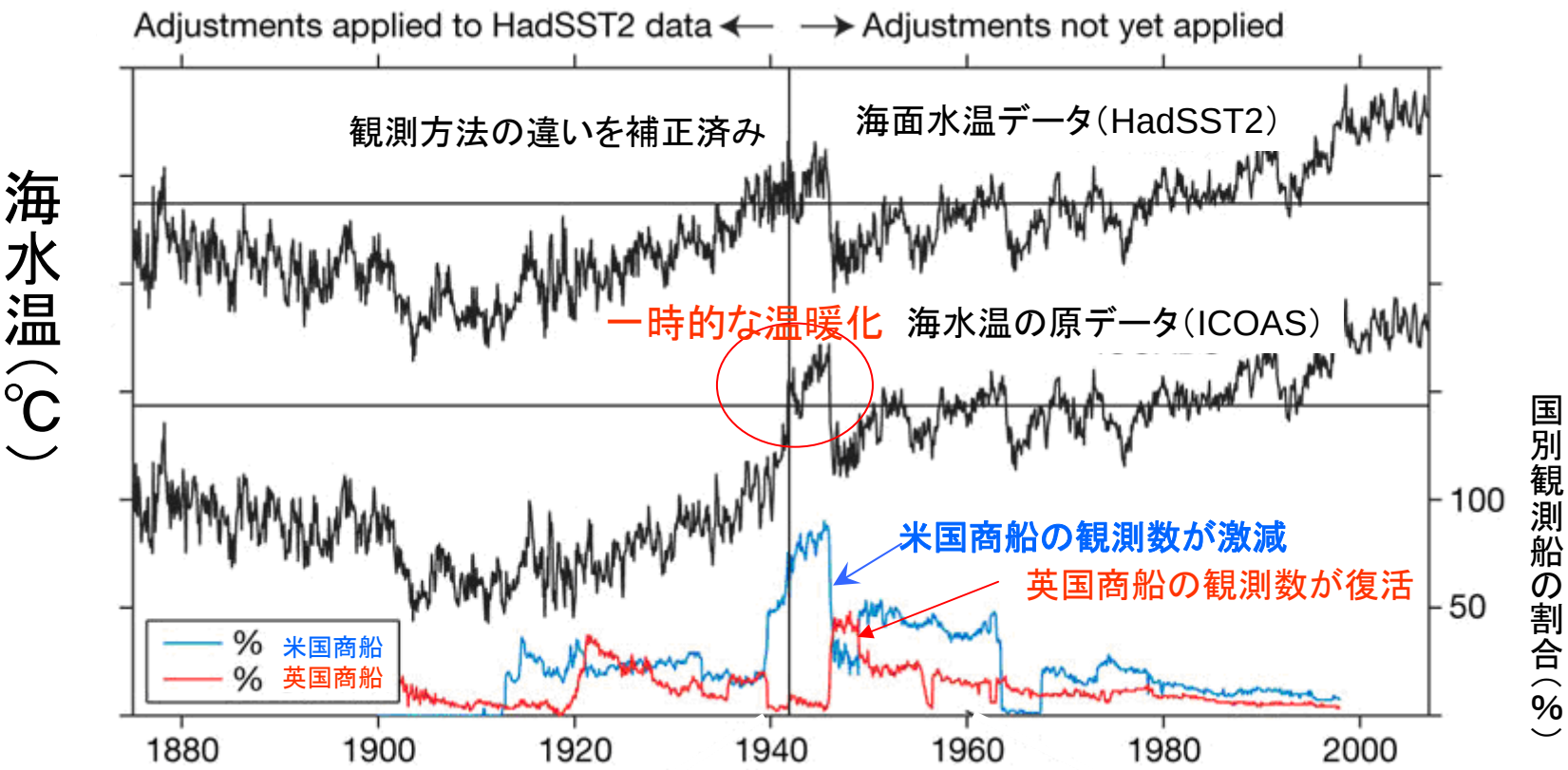


Figure 2.10. *Schematic diagram showing the various radiative mechanisms associated with cloud effects that have been identified as significant in relation to aerosols (modified from Haywood and Boucher, 2000). The small black dots represent aerosol particles; the larger open circles cloud droplets. Straight lines represent the incident and reflected solar radiation, and wavy lines represent terrestrial radiation. The filled white circles indicate cloud droplet number concentration (CDNC). The unperturbed cloud contains larger cloud drops as only natural aerosols are available as cloud condensation nuclei, while the perturbed cloud contains a greater number of smaller cloud drops as both natural and anthropogenic aerosols are available as cloud condensation nuclei (CCN). The vertical grey dashes represent rainfall, and LWC refers to the liquid water content.*

出典：IPCC AR4(2007)

④自然変動？：第2次世界大戦頃の気温上昇

観測データの精度に問題あり

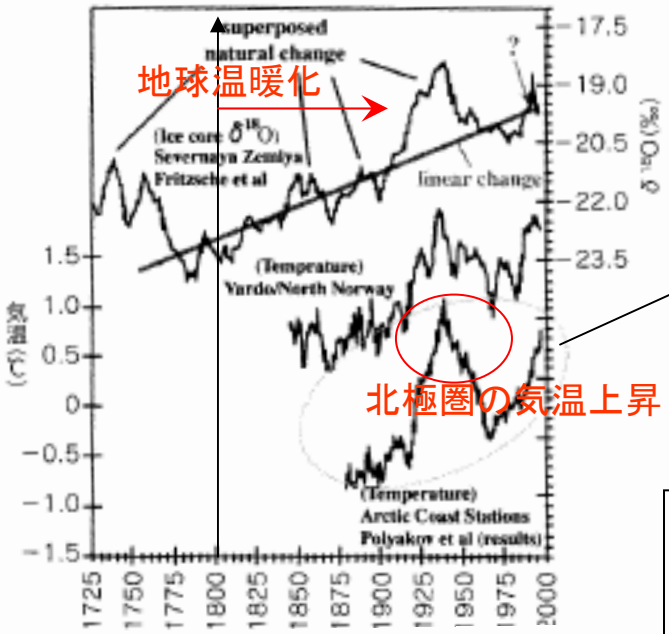


（出典：Thompson et al., Letter Nature, 2008）

戦時中は米国商船数が増加：エンジン室から海水採水（高温バイアス傾向）
戦後は英国商船数が復活：バケツによる海水採水（低温バイアス傾向）

④自然変動？：小氷河期からの復元

図4.3（上） 北極海の島で採掘された氷河のコアの解析により、酸素同位体（O_{18}）から推定した1725～1995年までの気温変化。図4.1の直線的変化を1800年前後まで延ばすことができる。すなわち、直線的気温上昇は1800年頃から始まっていた（Fritzsche、2006年）。
（中）ノルウェーでの気温（寒暖計）。
（下）図2.4の北極圏（Arctic）と同じものを再現してある。（中）（下）の変化と氷コアから得られた温度が似ていることに注意。

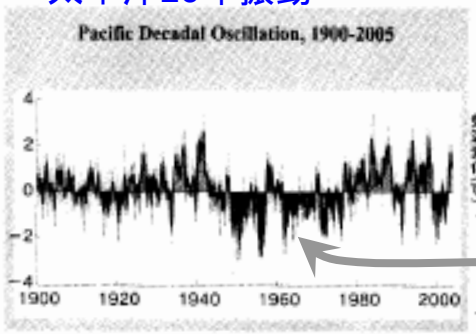


赤祖父説

○地球温暖化の上昇トレンドは1800年ころから開始した。多くの氷河の融解の始まりと一致。小氷河期からの気候復元が原因（原因は不明）。
○1940年前後の気温上昇は北極圏で顕著。いずれも自然変動（原因は不明）

○地球温暖化の上昇トレンド上に重なる長周期の上限変動は太平洋数10年振動（Pacific Decadal Oscillation, PDO)と良く対応する。

太平洋10年振動



1900年からの気温上昇と変動

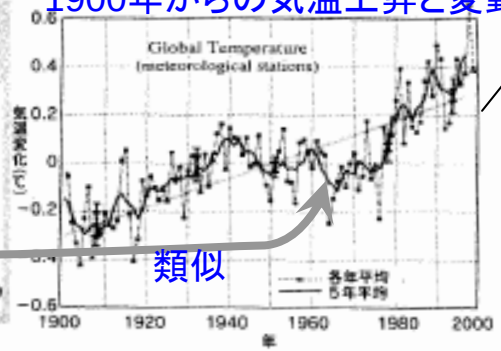
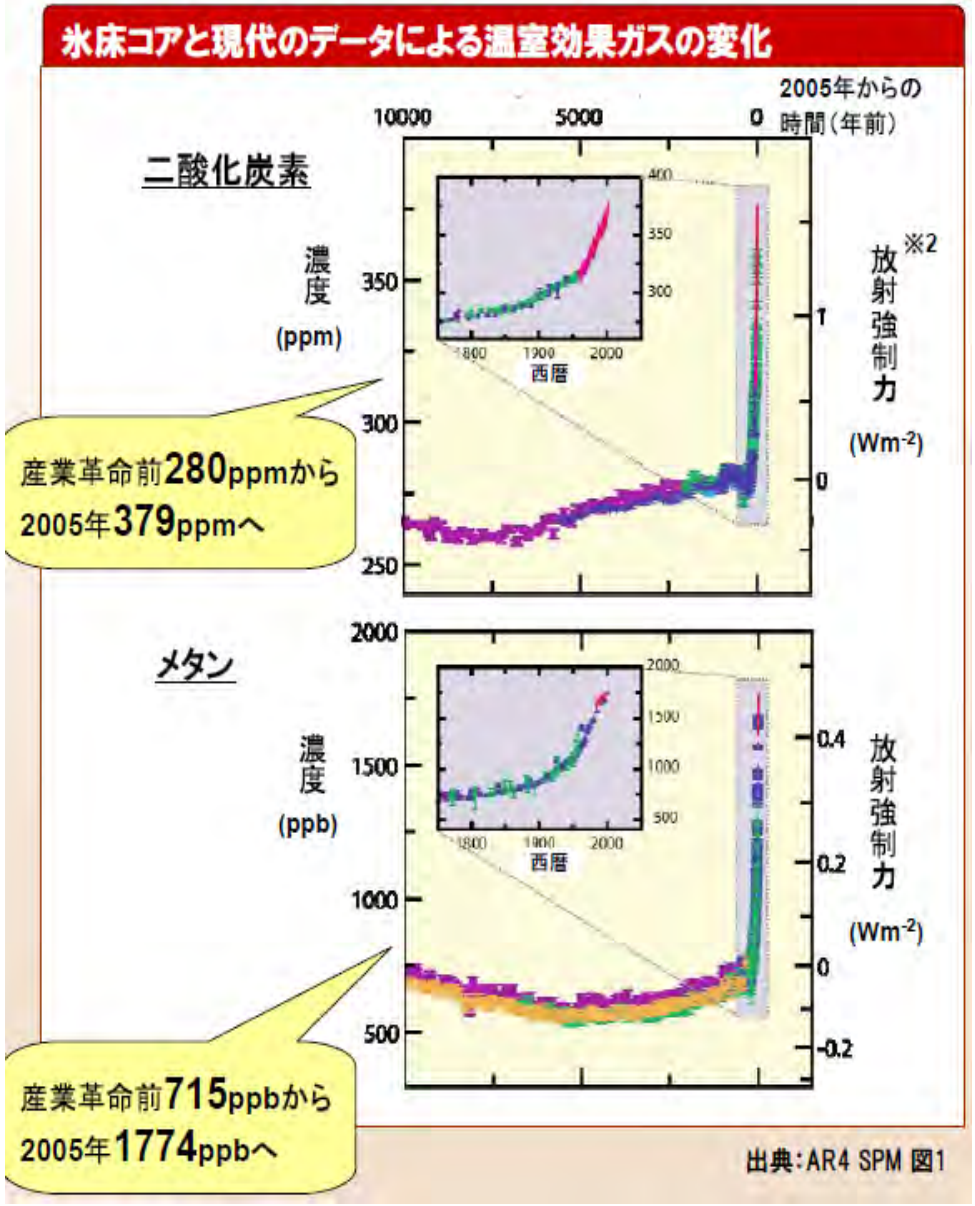


図5.3A 地球全体としての温度変化（右）と太平洋振動（左）の変化を比較した図（R.A. Keen、2007年）。

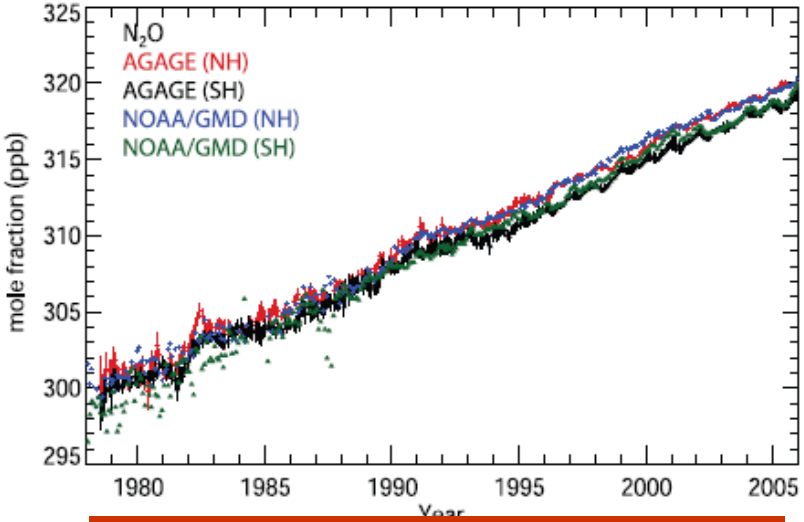
赤祖父仮説：気候変化は生じている。原因は気候復元が大部分である。
①自然変動： 0.5℃/100年（復元効果）
②IPCC観測：0.6℃/100年（最近）
③GHG影響＝②-①＝0.1℃/100年
（温暖化はIPCC予測の1/6程度）

（出典：赤祖父俊一；正しく知る地球温暖化、2008年）

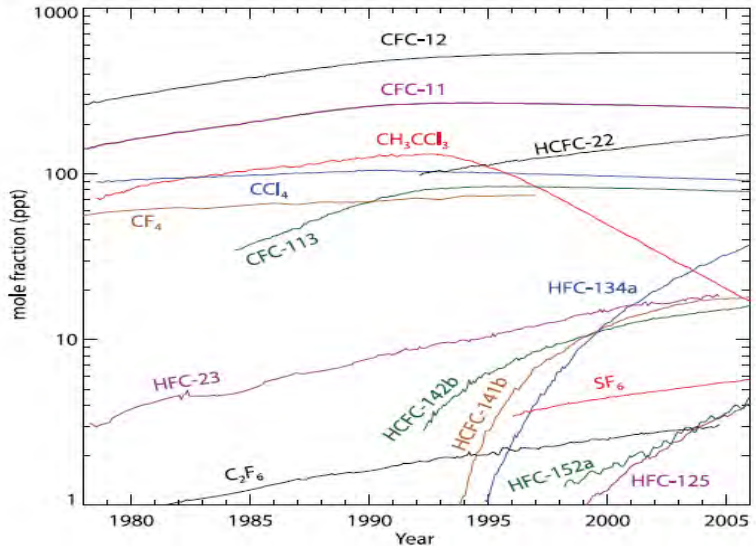
⑤CO2、メタン等の6種類の温室効果ガスが増加



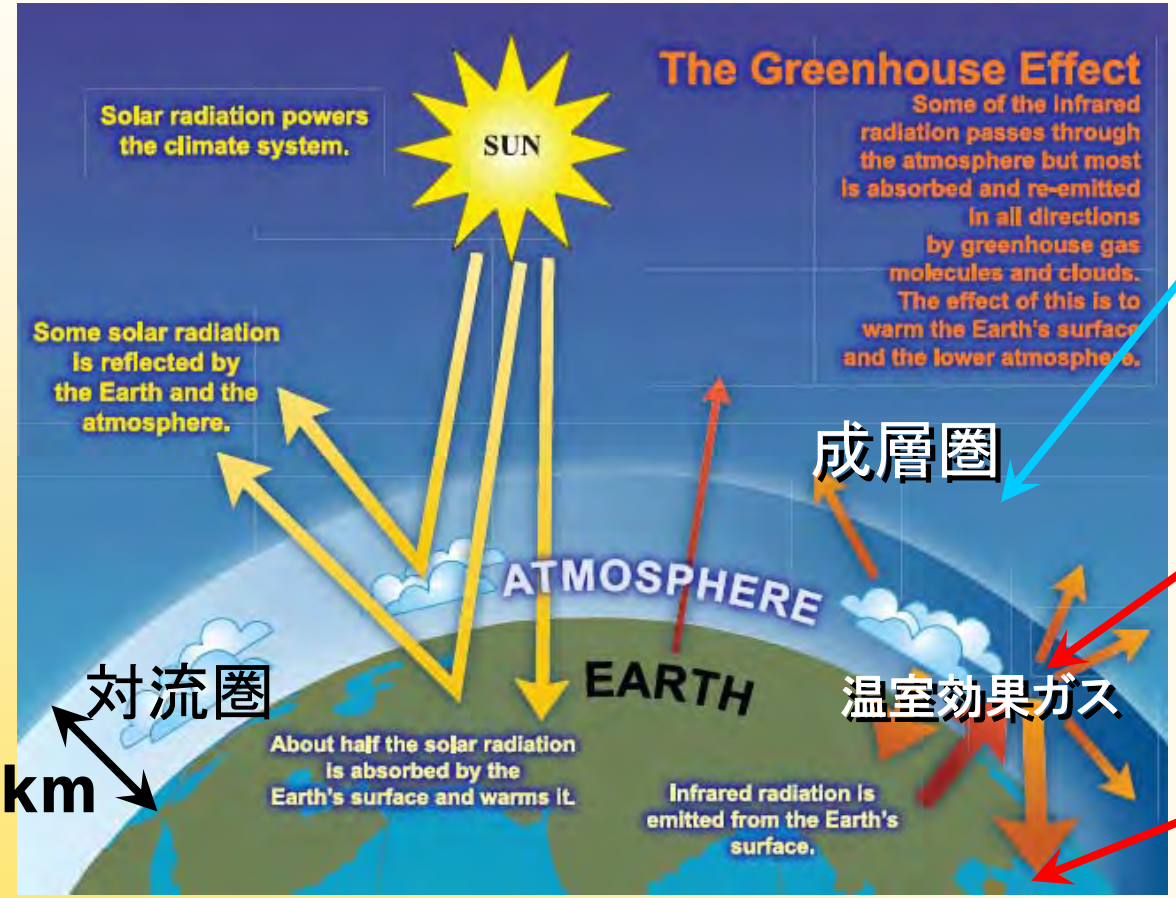
N2Oの大気中濃度の増加



HFC, PHFの大気中濃度の増加



温暖化理論が正しいとすると、



対流圏

10km

成層圏気温が低下

対流圏気温が上昇

地表気温が上昇

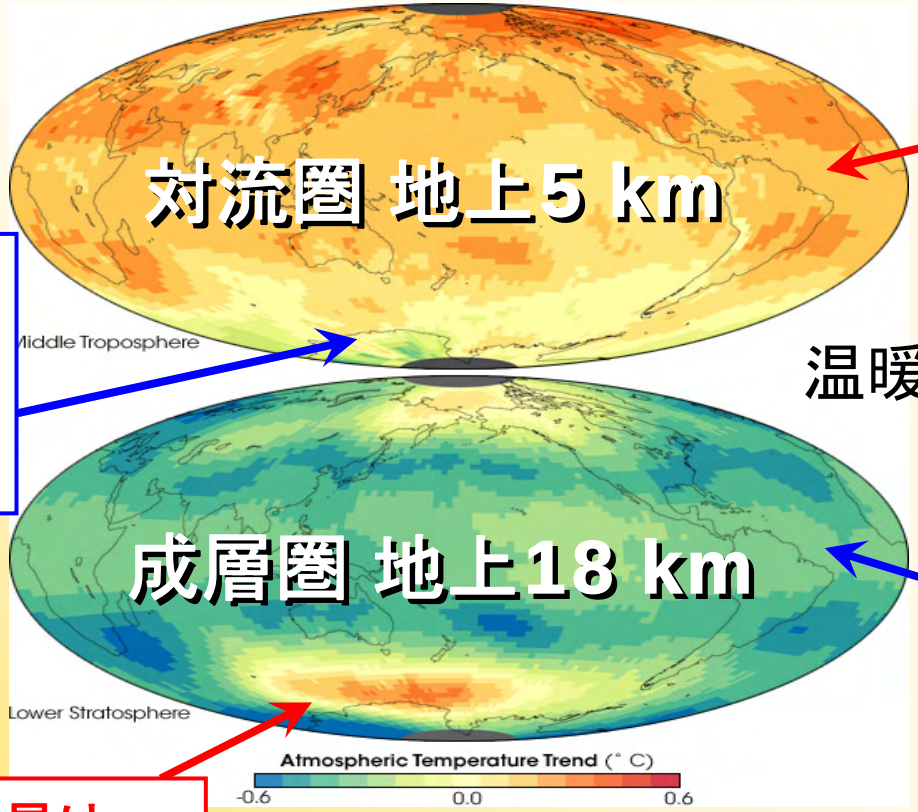
出典：IPCC AR4 WG1 FAQ1.3, Fig.1

衛星データの最新の処理結果は、理論どおり

長期間、衛星データからは温暖化傾向が把握できなかった（軌道計算のミス）

南極は例外！

南極の気温低下はオゾン層破壊が原因



対流圏気温上昇が確認

↓

温暖化理論が証明された

↑

成層圏の気温低下が確認

南極の温度上昇は、成層圏の突然昇温（数10℃）現象が原因

（1979年～2005年の変化）

出典：NASA Earth observatory

⑥森林伐採・砂漠化-温帯の森林は温暖化を助長

温帯林の効果：長期的には①太陽放射エネルギーの吸収が卓越するので、温暖化を助長

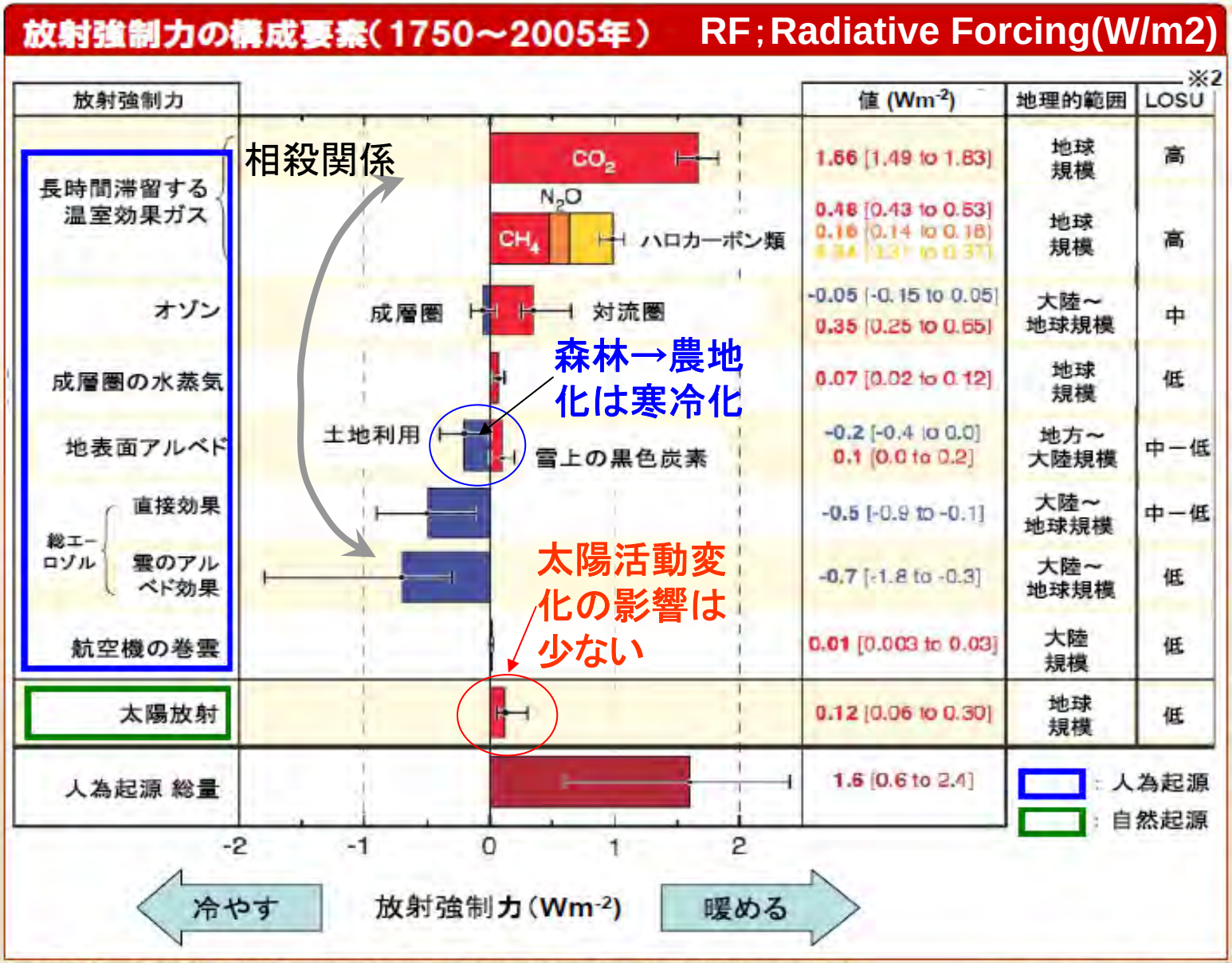
植林によるカーボンオフセットは逆効果？

熱帯雨林の効果：長期的には②蒸発散による冷却効果が卓越するので、寒冷化を助長

（出典：S. Gibbard et al, J. *Geophysical Research Letters* on December 8, 2005.., Letter Nature, 2008）

森林は、以下の3種類の効果を持つ複雑なシステムである。
①太陽エネルギー吸収による温暖化効果（アルベドが小さい）
②蒸発散による冷却効果
③CO2吸収による温暖化緩和効果（十分成長するとネットの吸収量はゼロ）

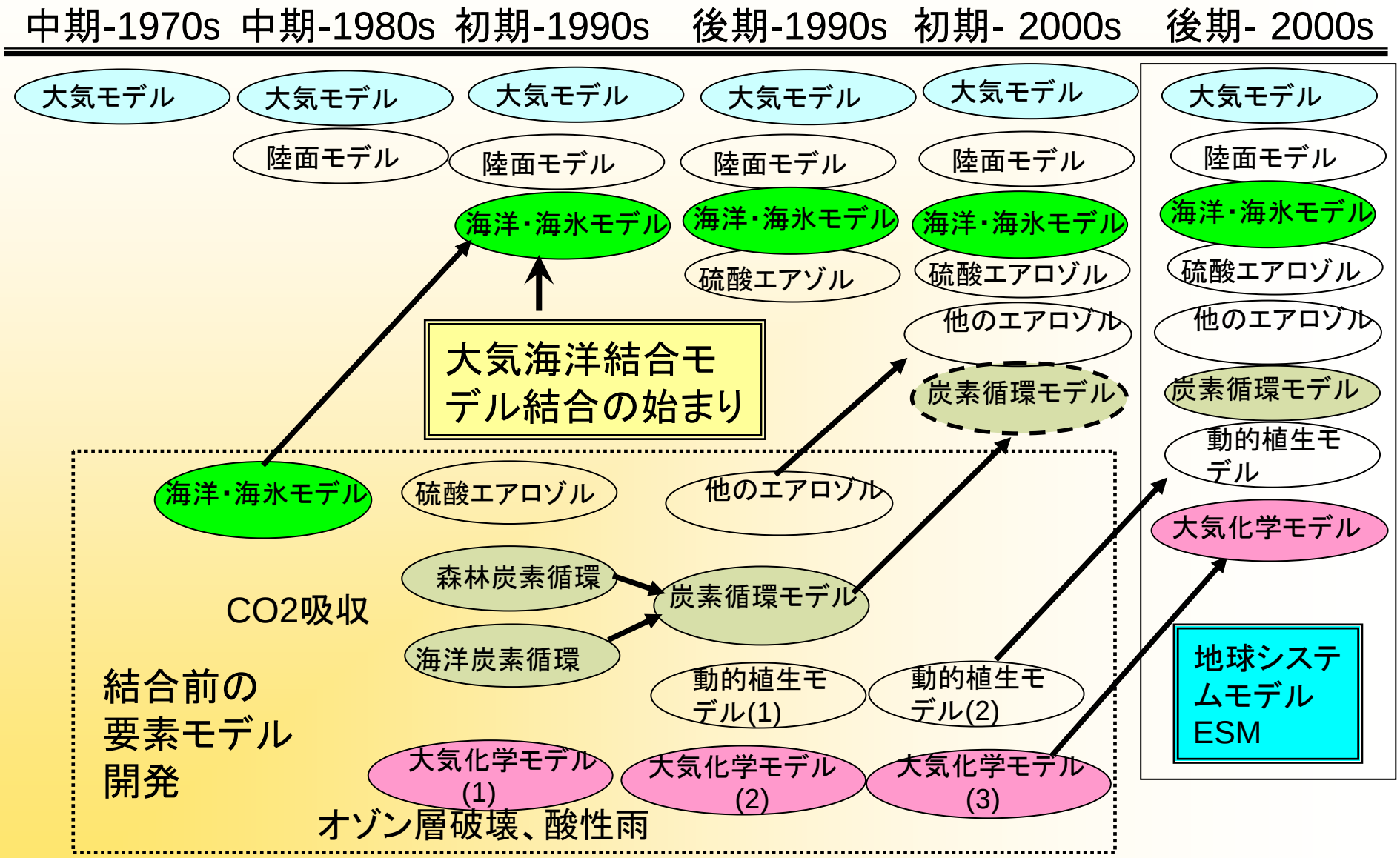
様々な原因は放射強制力（RF）で比較可能



※2「Level Of Scientific Understanding」の略で科学的知見レベルのことを示す。

出典：AR4 SPM 図2

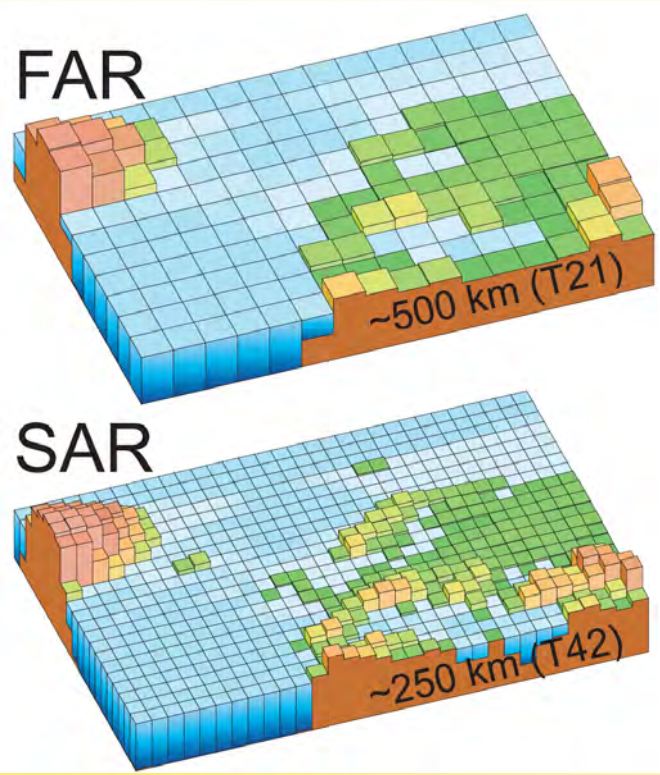
（2）予測モデルの精度は向上したか？：モデルは発展途上



出展：IPCC TAR(2001)

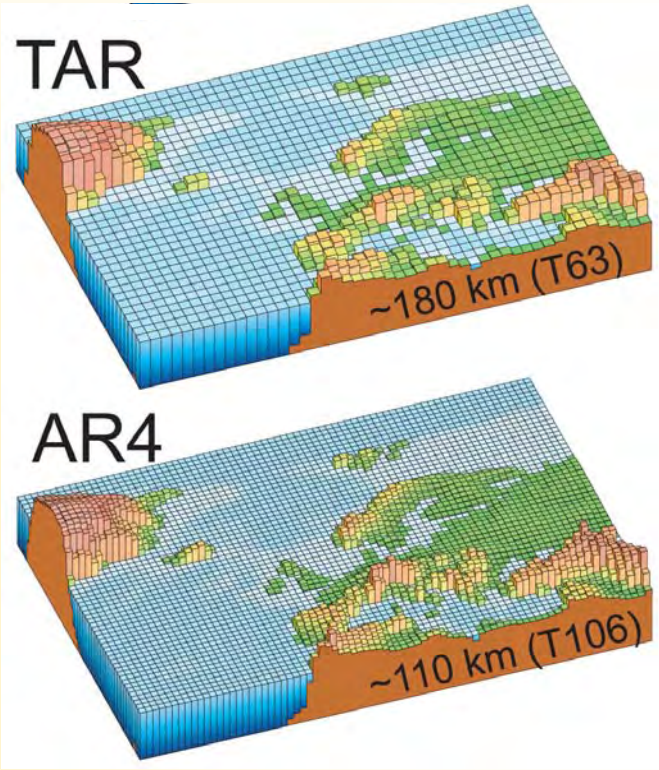
計算機の進歩と共に解像度が向上

第1次評価書（1990）



第2次評価書（1995）

第3次評価書（2001）



第4次評価書（2007）

出典：IPCC AR4 WG1 Fig.1.4

世界の気候モデルの空間解像度と特徴

IPCC報告書(年度)	気候モデルの特徴、典型的な解像度（スペクトル法の波数で解像度を示す指標）
第1次FAR(1990)	・大気モデル＋海洋混合層（1層） ・解像度～500km（T21） ・2×CO_2濃度の平衡計算のみ
第2次SAR(1996)	・大気モデル＋海洋混合層（1層） ・解像度～250km(T42) ・2×CO_2濃度の平衡計算のみ
第3次TAR(2001)	・大気海洋結合モデルAOGCMの結果を始めて紹介 ・解像度～180km（T63） ・フラックス調整をしないで、CO2濃度年率1%増の漸増予測計算が初めて可能
第4次AR4(2007)	・AOGCMが20数例紹介 ・解像度～110km（T106） ・排出シナリオ＋濃度安定化シナリオの漸増予測計算例を多数紹介(平均すると見かけ上バラツキが増加）

出典：IPCC AR4 WG1

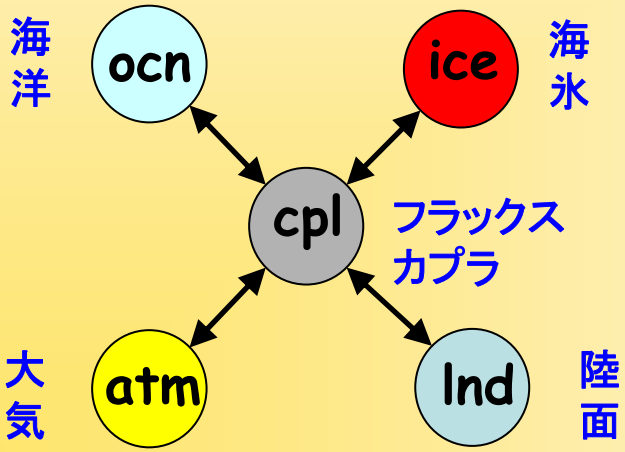
文科省共生Pの主なモデルと特徴（AR4とほぼ同じ）

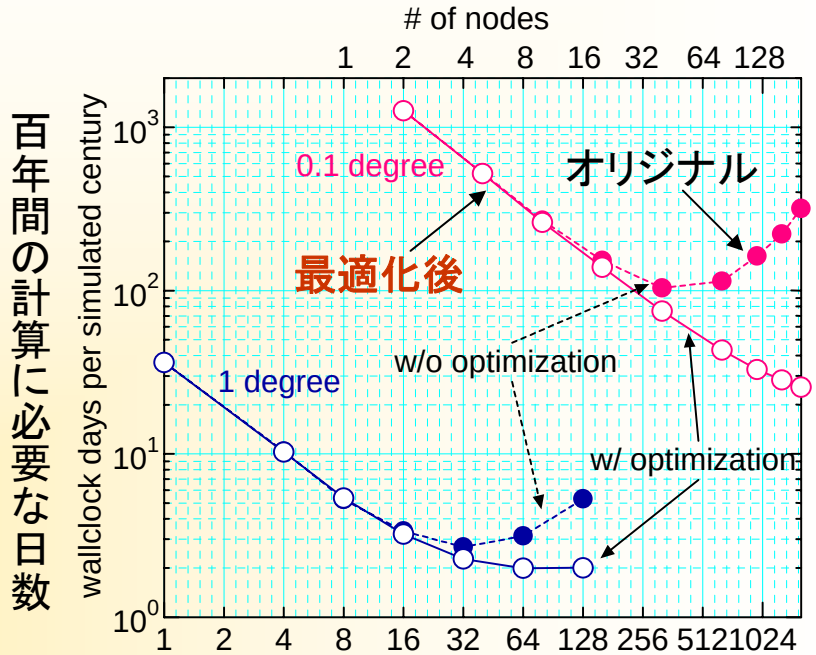
担当機関	主目的	モデル種別	解像度		積分期間
			大気	海洋	
東大気候システム研究センター、国立環境研、地球環境フロンティア	世界最高解像度モデルによる21世紀気候変化予測	大気海洋結合モデル AOGCM	110km	20km	1850−2000 2000−2100 （濃度シナリオ）
電中研、米国大気研究センター、ロスアラモス国立研等	ポスト京都議定書の濃度安定化レベル検討のための450年予測	大気海洋結合モデル AOGCM	160km	110	1870−2000 2000−2450 （濃度安定化シナリオ）
地球環境フロンティア、国立環境研、東大など大学	炭素循環・大気組成変化へのフィードバックを含む21世紀気候変化予測	炭素循環・大気組成・気候結合	280km	110km	1850−2000 2000−2100 （CO_2排出シナリオ）
気象研、気象庁等	21世紀末における地域気候変化、極端現象の予測	海面温度指定、高解像度大気モデル	全球 20km 領域5km	ー	現状海面温度 21世紀末海面温度 各10年×2ケース

（文献（丸善出版社、2006）の表(p.96)より抜粋）

気候モデルの高速化には高度な科学技術が必要

- 結合モデルCCSM3の構成（NCAR）
  大気モデル: CAM3（150km), T85L26
  陸面モデル: CLM, T85
  海氷モデル: CSIM, 1度
  海洋モデル: POP(100km)
  フラックスカプラ: CPL, MPI（時間、空間内挿、異なる解像度の保存則維持）
- MPMD型並列プログラム、Hub-and-spokeシステム（要素モデルの変更容易）





（出典）電中研共生プロジェクト

CPUを増やすと計算時間が逆に増加する不都合な場合がある:しかし、通信方法等を改良した高度な計算科学技術があれば、地球シミュレータ(ES)等のスパコン能力をフルに発揮できる。

各要素モデルの構成：開発は100名規模

●大気要素モデル(CAM3)　＜T85(波数=85)L25(鉛直層数=25＞

◆力学過程

基礎方程式 3次元全球静力学プリミティブ方程式

◆座標系 水平: 球面座標系、鉛直:ハイブリッド座標系

◆離散化：水平方向　球面調和関数によるスペクトル変換法。ただし、水蒸気のみセミラグランジュ法を使用。
鉛直方向 差分法(エネルギー保存を考慮)

◆時間積分：中央差分、セミインプリシット、Asselin(1972)フィルター使用。
ただし、水平・鉛直拡散、セミラグランジュ法による水蒸気移流。
積雲対流と大規模凝結項は、time-splitting手法により陰的計算。

◆物理過程

・放射 Briegleb (1992)およびKiehl and Briegleb (1991)に基づく。微量気体の扱い含む。

・雲量診断 Slingo (1987)に基づく。

・積雲対流 プリュームアンサンブルモデル(Zhang and McFarlane, 1997)および鉛直3層プリュームモデル(Hack, 1994)。

・鉛直拡散、大気境界層 ノンローカル乱流フラックススキーム(Holtslagand Boville, 1994)。

・重力波抵抗 McFarlane (1987)、大規模凝結、乾燥対流調節など。

●海洋要素モデル(POP) ＜水平方向1度、鉛直40層＞

◆力学過程

基礎方程式 3次元全球静水圧近似プリミティブ方程式、自由海表面

◆座標系 水平方向: 一般直交座標系(北半球では極をグリーランド上に変換し、北極点の数学的微分不連続性を解消。2北極座標)

◆鉛直方向: z座標系

◆時間積分 順圧成分: インプリシット、傾圧成分およびトレーサ: leap-flog

◆物理過程

・水平粘性 Anisotropic Viscosity

・水平拡散 Gent-McWilliamsスキーム+Rediスキーム

・鉛直混合 対流調節

●陸面要素モデル(CLM)　＜水平方向=大気モデルと同じT85、鉛直方向5層＋積雪層＞

◆物理過程

・土壌温度(拡散方程式)、

・土壌水分(マトリックス・ポテンシャル法)

・可能蒸発量(空気力学的抵抗法)

・蒸発量(β法)

・表面流出量(浸透量の関数)

・中間流出量(飽和透水係数の関数)

・蒸散量(個葉の気孔抵抗)

・積雪/融雪(TOPMODEL)

◆サブグリッド・スケールの影響を考慮

・土地利用5タイプ、植生はさらに4タイプに分割

●海氷要素モデル(CSIM)　＜水平方向=海洋モデルと同じ1度、鉛直5層＞

◆力学過程

基礎方程式 Ice Fraction、Ice Volume、
Ice Internal Energy、Snow Volume等

◆座標系 水平方向: 一般直交座標系(北半球では極をグリーランド上に変換、海洋モデルと同じ)

◆物理過程、熱力学過程

Multi- Ice Thickness Category (ITD)
Elastic Viscous Plastic (EVP)レオロジー等を考慮

（出典）電中研共生プロジェクト

慣性の大きい地球を予測するためのホットスタート

初期値を得るための計算
コールドスタート

濃度一定（1870年）の長期計算（数百年～千年）

初期値の選び方は研究課題

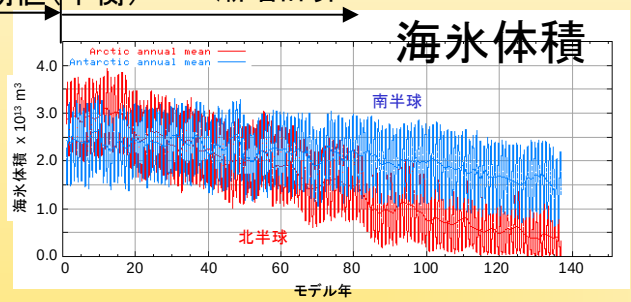
1870年

T_1　T_2

スピンアップ計算（様々な振動モードの出現を期待）

初期値：
①dS/dt= f(V, α)=0
平衡状態からのスタート

初期値（平衡）　漸増計算



（出典）電中研共生プロジェクト

②dS/dt= f(V, α)≠0（不明）
赤祖父説：1800年から小氷河期の復元：現在のレベルでは取り扱い困難。

予測計算（ホットスタート）

気候予測メンバー数（AR4）
電中研：3
NCAR：5

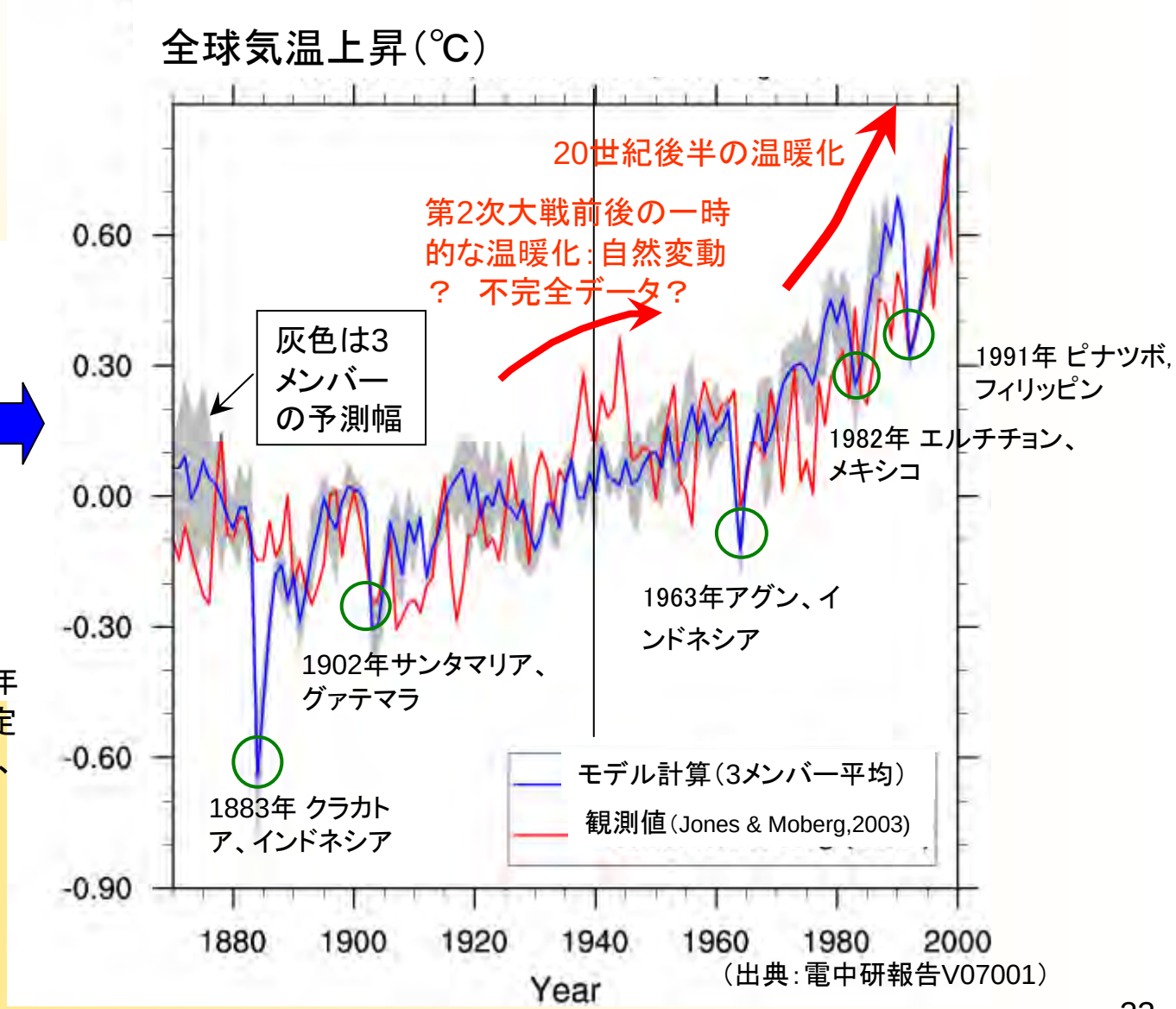
（参考：気象予測：10～50メンバー）

1870年　温室効果ガス濃度の増加

初期値の読み込み
大気の温度、気流、気圧、水分
陸面の温度、土壌水分
海洋の温度、海流、海氷分布等

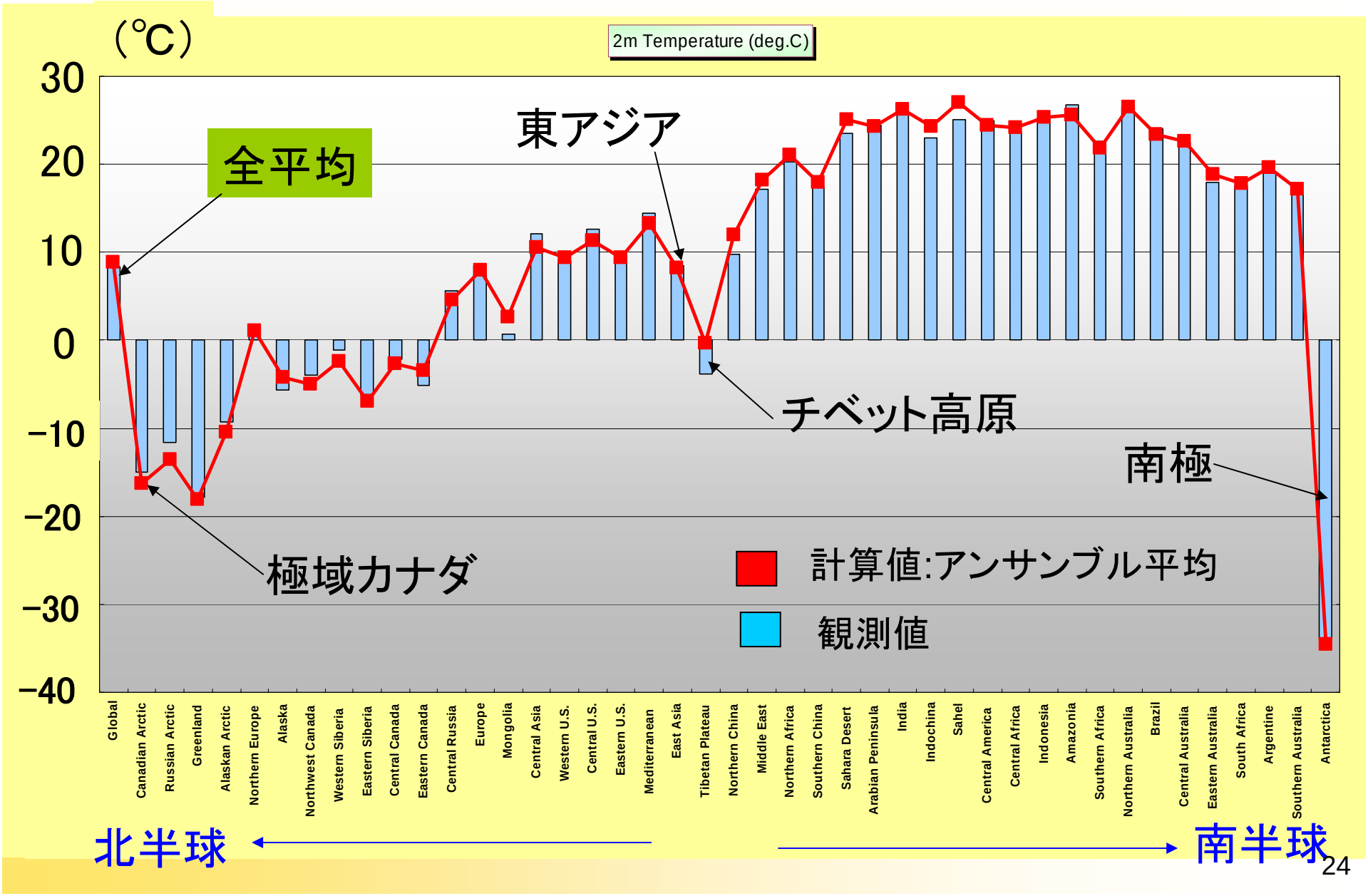
様々な要因の複合効果は気候モデルの再現計算で分析

【入力条件として考慮】
①太陽放射エネルギーの変化
・太陽定数の変化を入力
・将来予測では一定
②地球の公転軌道変化
・軌道要素を入力
・将来予測では一定
③火山爆発（エアロゾル）
・過去の噴出量を入力
・将来予測では一定
⑤CO2、CH4, HFC等のGHG
・過去のデータを入力
・将来予測ではシナリオ入力
⑥森林伐採等の地表面変化
・1990年当時のデータを1870年の初期値に流用（計算の不安定化）（データがないため。実は、深刻な問題）

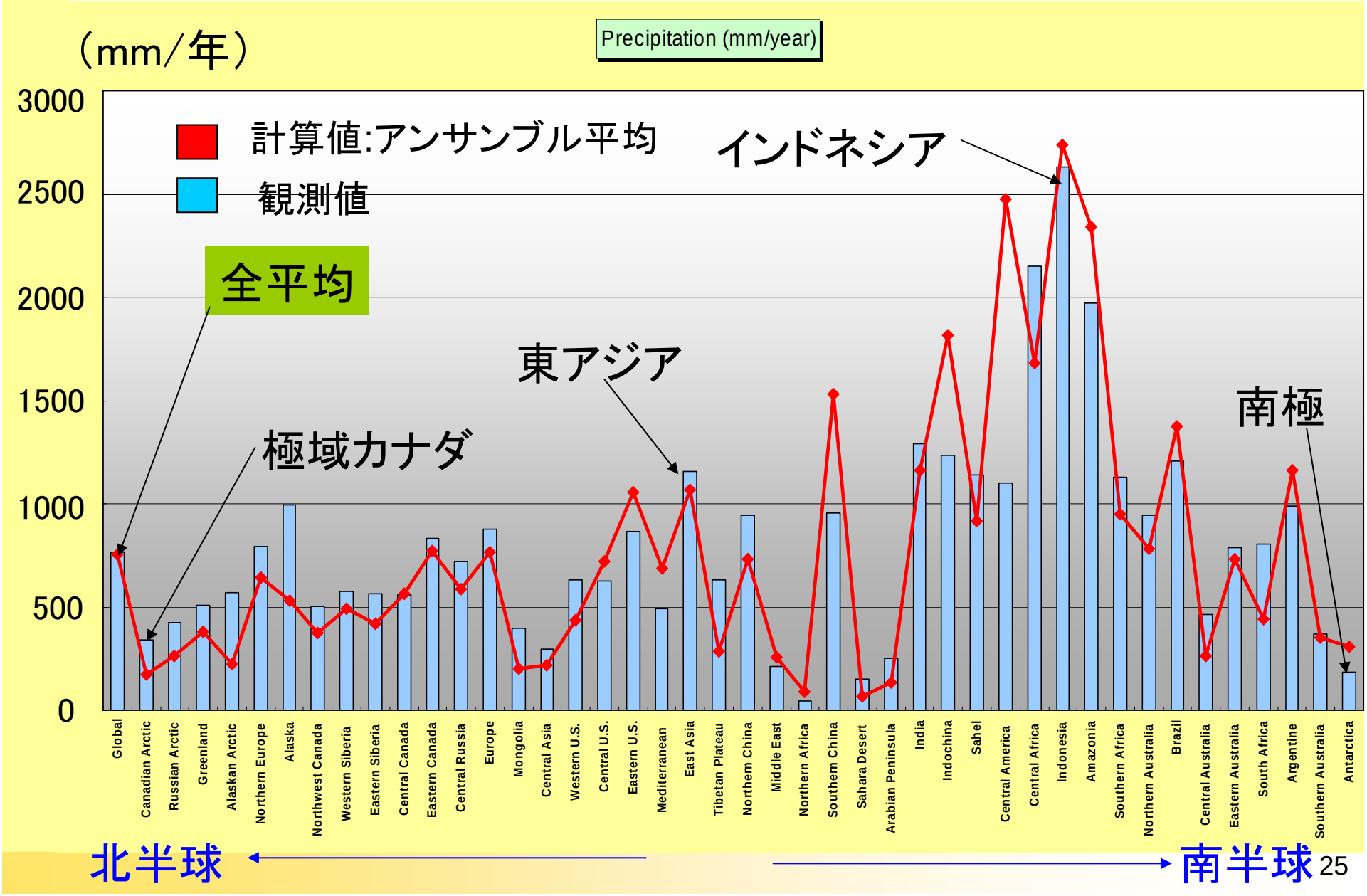


（出典：電中研報告V07001）

アンサンブル平均（10年間平均）：気温再現性は良好



アンサンブル平均（10年間平均）:降水量の精度はやや劣る



平衡気候感度(CS)と遷移気候応答(TCR)は異なる

平衡気候感度(CS)　遷移気候応答TCR

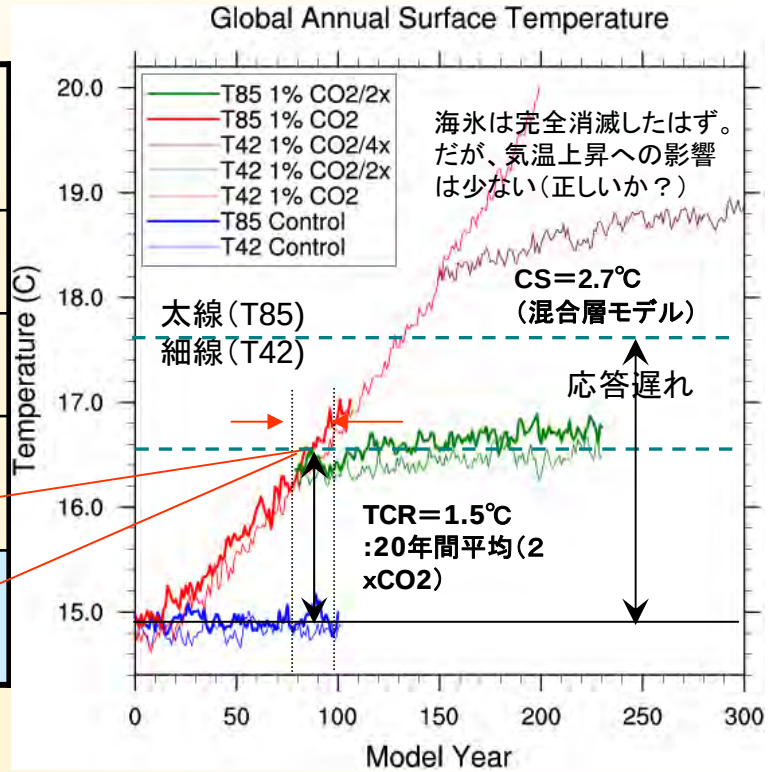
(単位: ℃)

モデル名	Equilibrium（平衡実験）	Transient（漸増実験）
CSM1（旧)	2.1	1.47
PCM1 (旧)	2.1	1.32
CCSM3 T42（テスト用）	2.5	1.4
CCSM3 T85（本計算用）	2.7	1.5

Source: Meehl et al. (2004)

一致しない

CO2濃度年率1%増の漸増実験結果



（出典）電中研共生プロジェクト

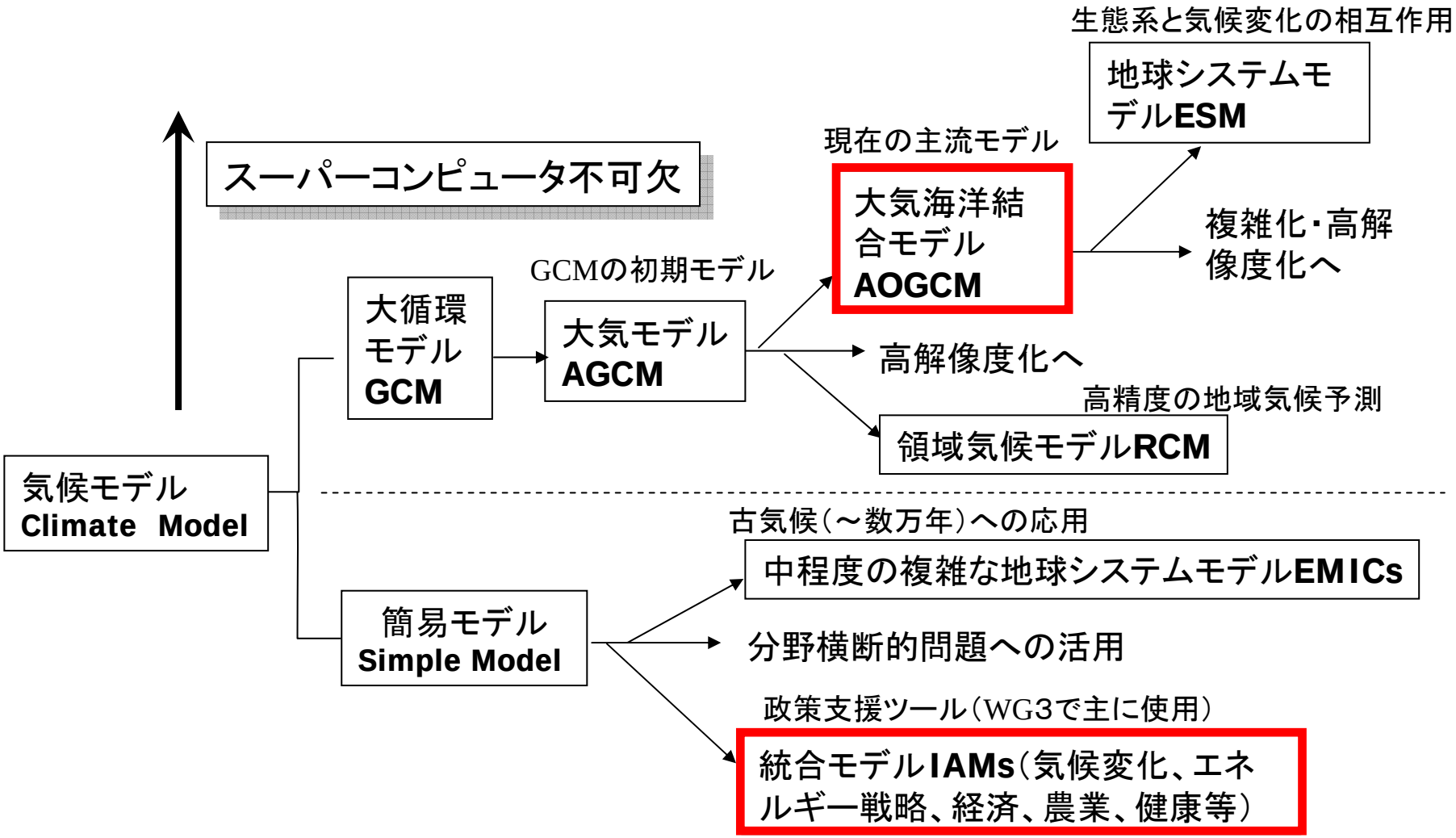
地球シミュレータで2種類のNCARモデル（T42;300km,T85;150km)による追試

TCR（≒100年後の気温上昇）＝0.6～0.8XCS

平衡昇温2℃⇒100年後：0.6～0.8X2℃＝1.2～1.6℃

ΔT(平衡昇温）＝CS･log2(C/C0), C=CO2濃度、C0=280ppm-CO2

(3)気候モデルは費用大，簡易モデルが便利



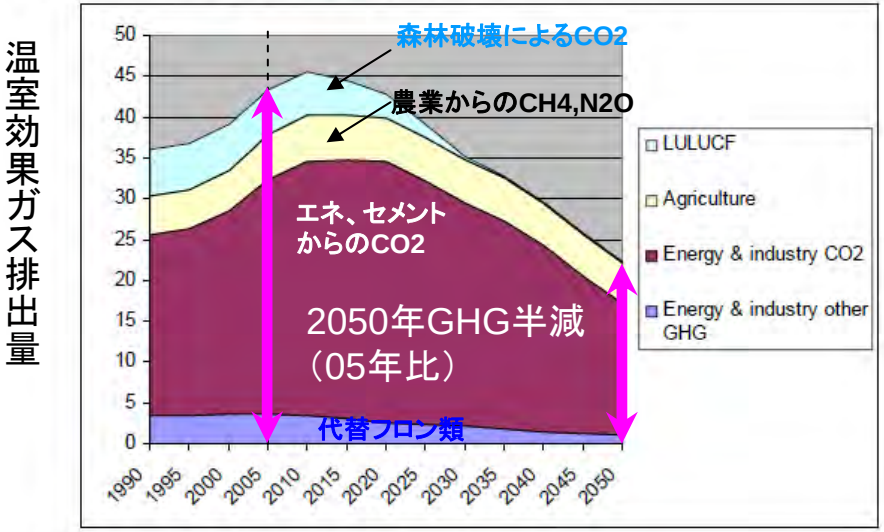
GCM: General Circulation Model, **AGCM** :Atmosphere General Circulation Model, **AOGCM**: Atmosphere Ocean General Circulation Model. **ESM**: Earth System Model, RCM: Regional Climate Model, **EMICs**: Earth System Model of Intermediate Complexity, **IAM**: Integrated Assessment Model

簡易モデルの使用例：2℃抑制から排出量を逆算（逆問題）

以下のEUの2℃抑制の排出量計算は、平衡気候感度CSを用いた簡易モデルの結果

Gt-CO2-eq（10億トンCO2-eq）

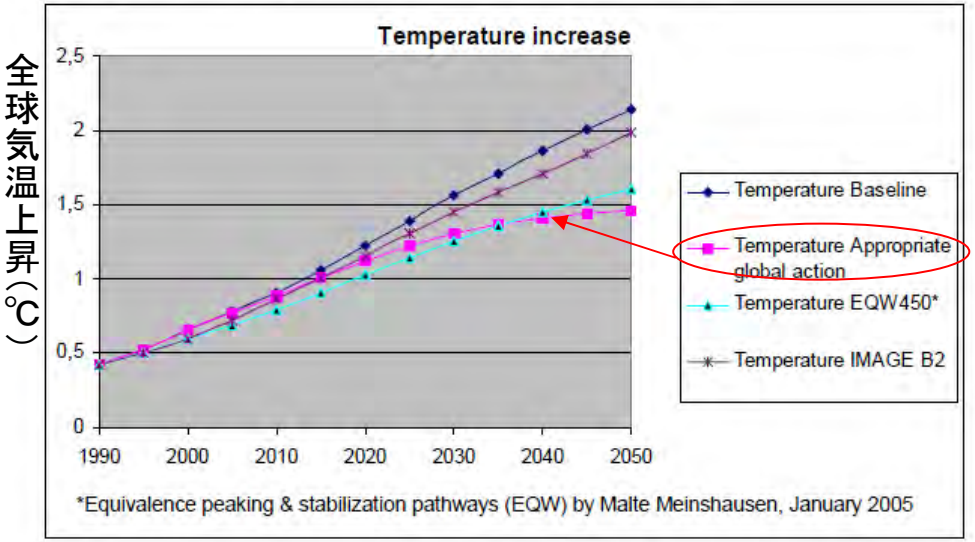
Figure 14 Emissions for all sectors in the appropriate global action scenario



Source: POLES (JRC, IPTS), G4M (IIASA), Image (PBL)

（出典：EU Commission Staff Working Document Patr1 {COM(2009) 39 final} {SEC(2009) 102} ,p.95

Figure 15 Global temperature increase for different emission profiles up to 2050



Source: Best estimate temperature increase MAGICC model

（出典：EU Commission Staff Working Document Patr1 {COM(2009) 39 final} {SEC(2009) 102} ,p.96

CO2を含む温室効果ガス（GHG)を簡易モデルで推定⇒2050年で半減（05年比）が必要。90年比では約36%減となることに注意

産業革命以降の気温上昇（平衡昇温）を2℃に仮定

高度な気候モデルでの予測は実行されていない：検証が不十分

EU提案（COP15)と湯原提案（450ppm）の排出量比較

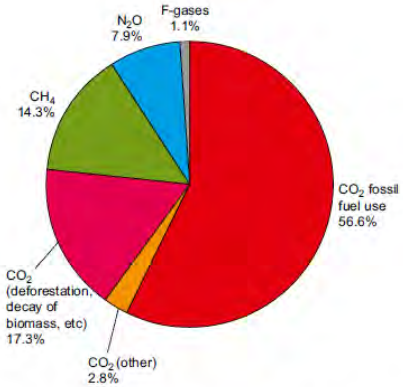
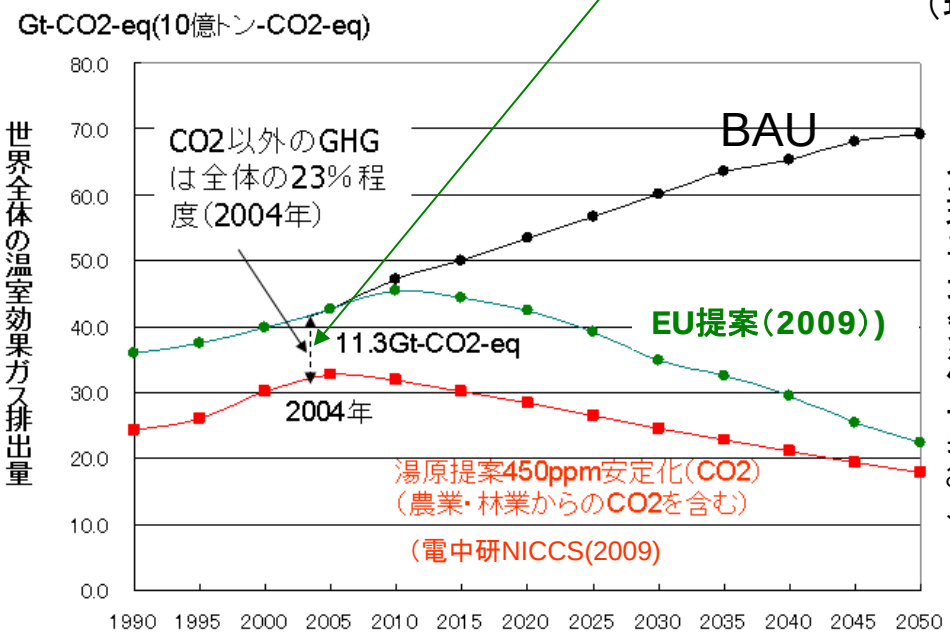


Figure TS.1b: *Global anthropogenic greenhousegas emissions in 2004 [Figure 1.1b].*

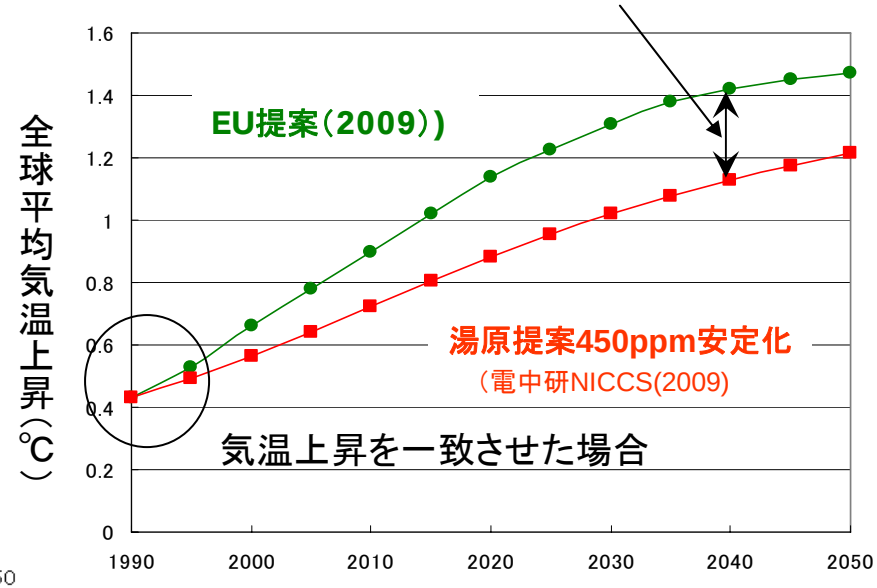
（出典IPCC AR4 WG3, p.28）

2004年、GHG全体排出量（49Gt-CO2-eq）のうち、CO2以外のGHGは約23%（11.3Gt-CO2-eq）を占める。日本は10%程度



（出典：EU Commission Staff Working Document Patr1{COM(2009) 39 final} {SEC(2009) 102} ,p.46, p.95より読み取った）

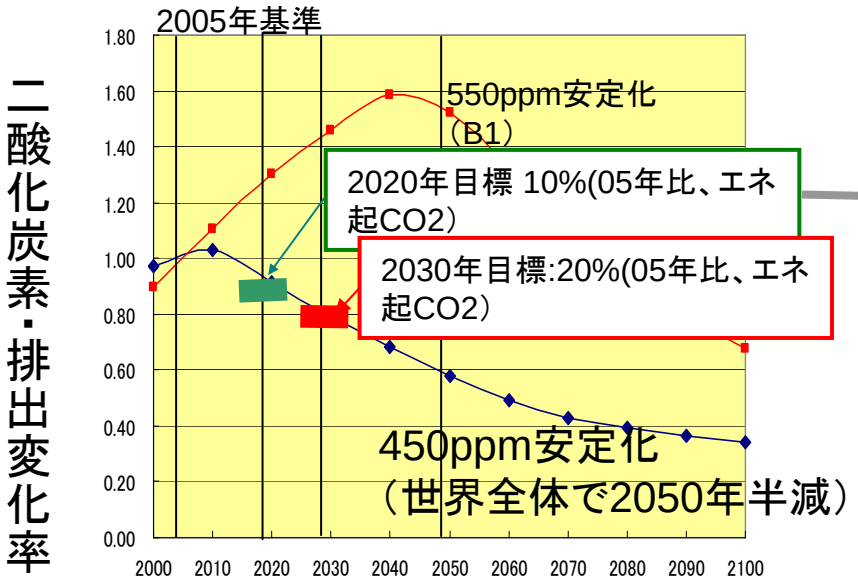
GHG全体とCO2単独の違いによる温度差（約0.2℃）
（現実世界では、硫酸エアロゾルの寒冷化効果が相殺）

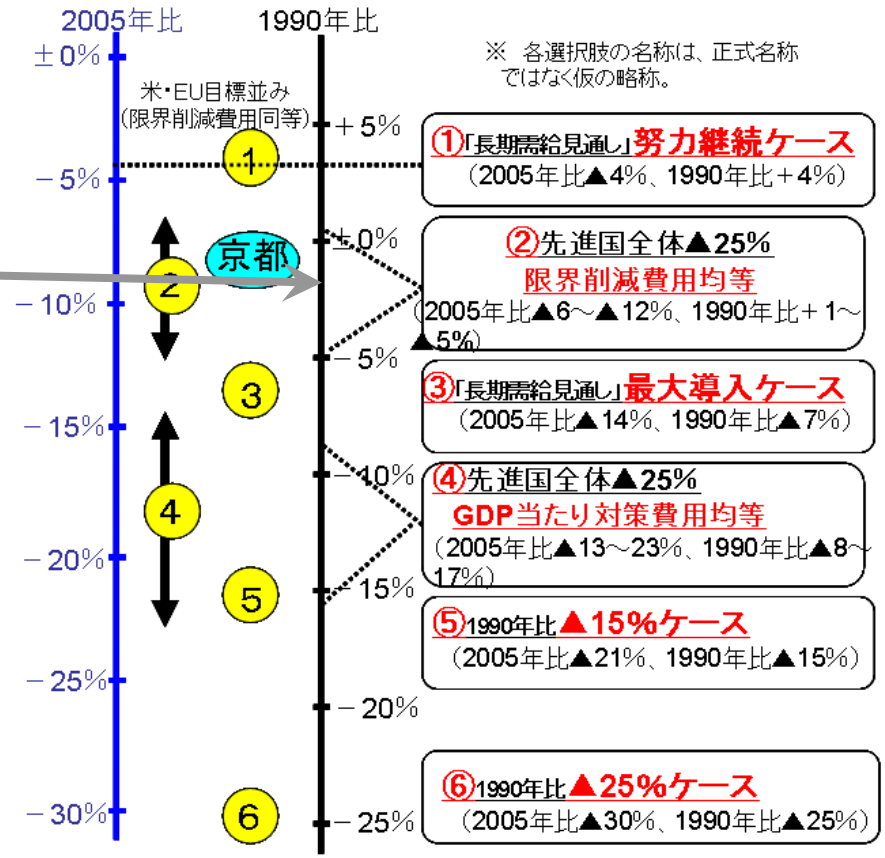


1990年の気温上昇をEUに合わせた場合
（簡易モデルでも気候の応答遅れを模擬できる）

気候科学からは日本の中期目標は湯原提案②でOK

根拠：CO2濃度450ppmとなるCO2排出量は▲10%。GHGに直すと▲9%（05年比）、▲2%（90年比）となり、京都目標▲0.6%を上回る





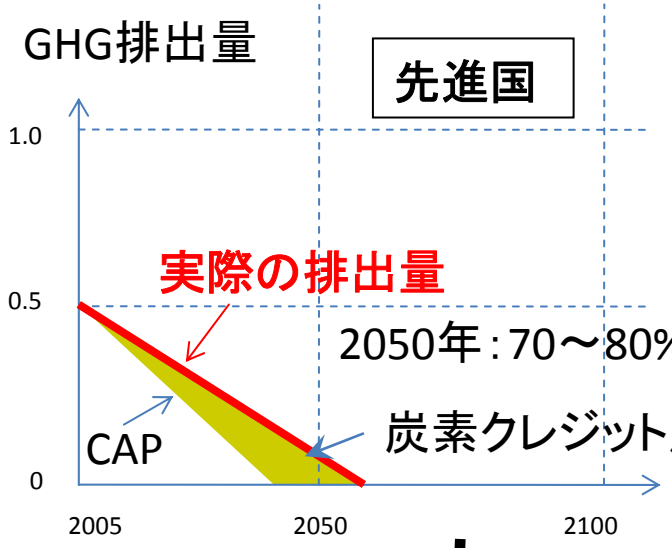
湯原提案②Y（第7回委員会、4月11日）
（①の限界コストで②の数値目標を目指す）

○2005年比	エネ起源CO2	▲10%
	GHG	▲ 9%
○1990年比	エネ起源CO2	＋0.6%
	GHG	▲2%

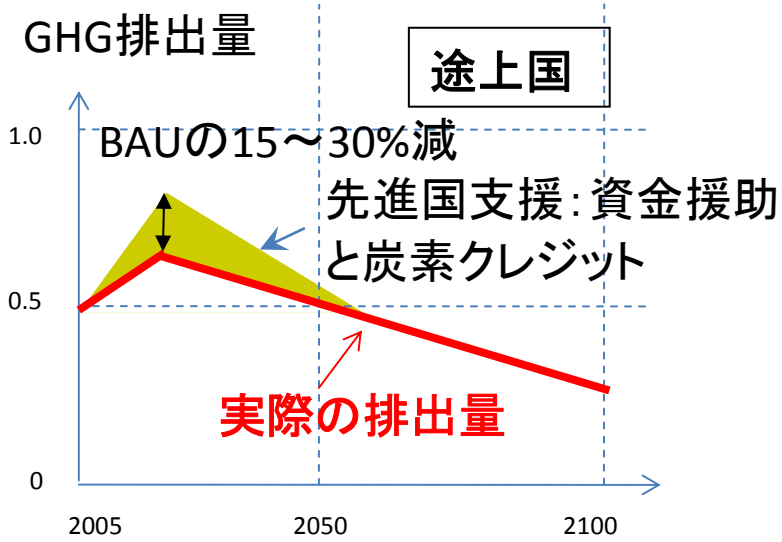
京都議定書

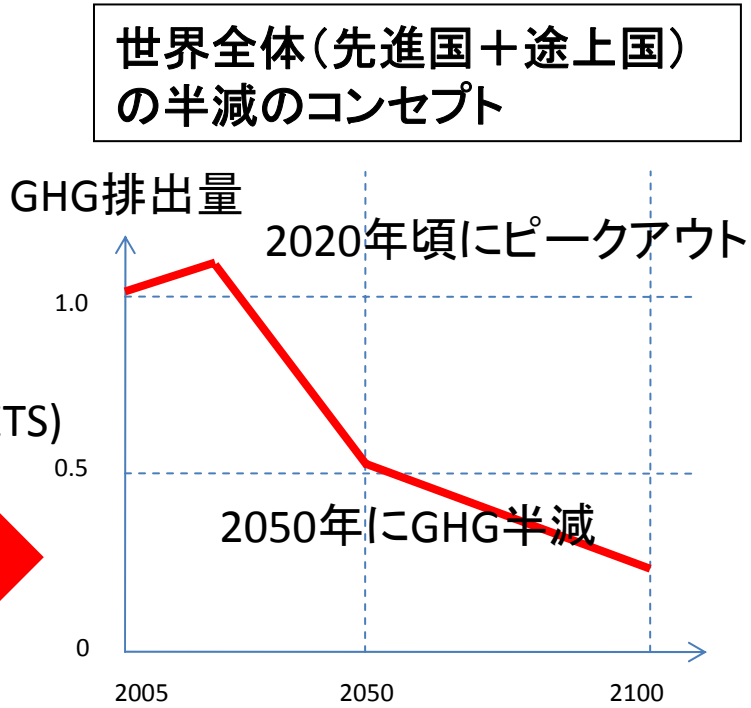
○1990年比	GHG	▲0.6%
	森林吸収	▲3.8%
	政府の排出権購入	▲1.6%

EU案：先進国と途上国の過大な削減⇒ETSの世界的拡大が狙い



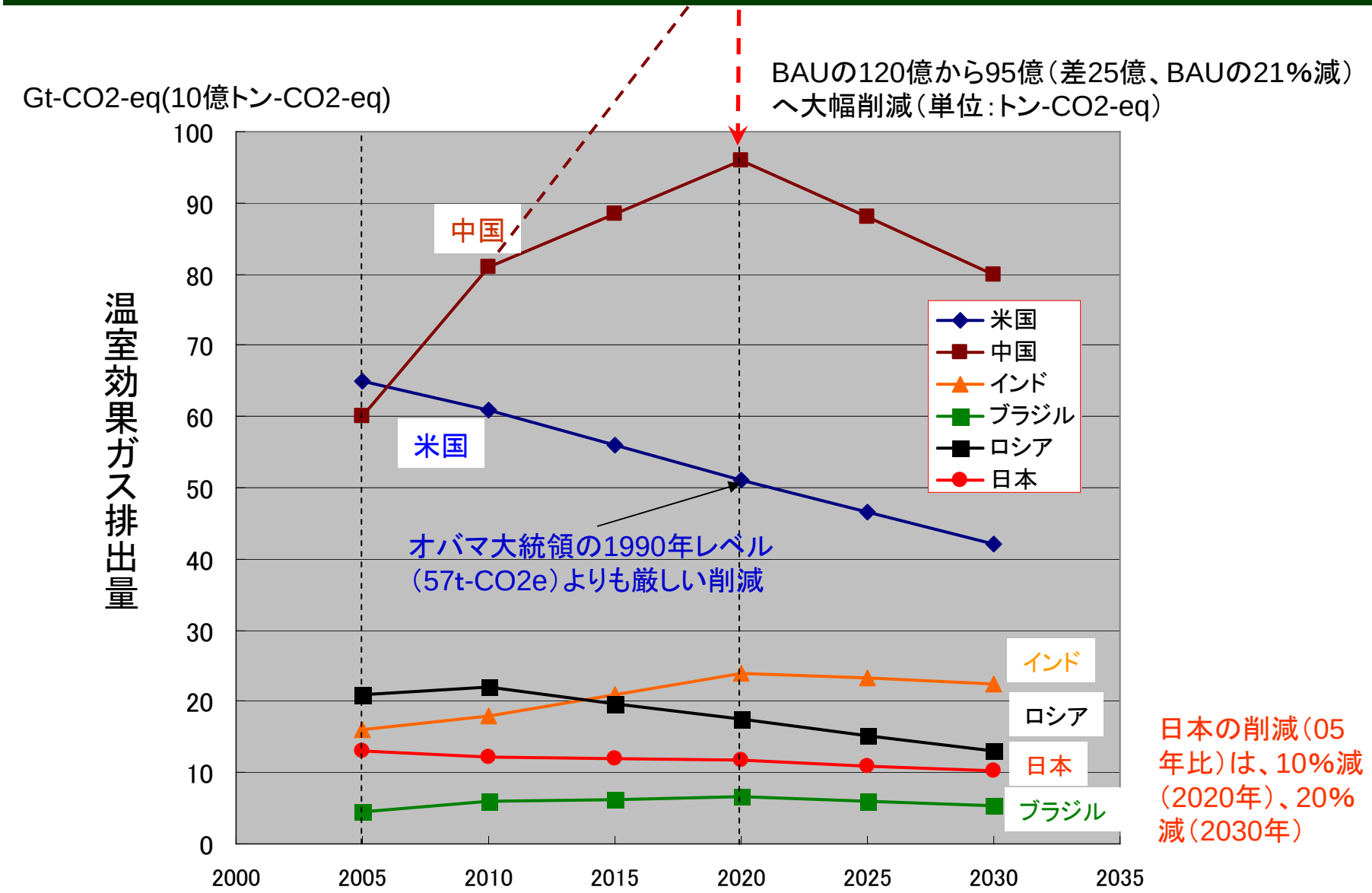
＋





先進国には自国の削減に加えて、大幅な炭素クレジット購入を要求。途上国には自国削減と資金援助による削減を要求。先進国には過大なCAP。⇒炭素クレジット売買に関してEUを中心とするOECD-ETSの設立が狙い。

EU案：米国、特に中国の大幅削減が不可欠、賛成が得られるか？



日本の削減（05年比）は、10%減（2020年）、20%減（2030年）

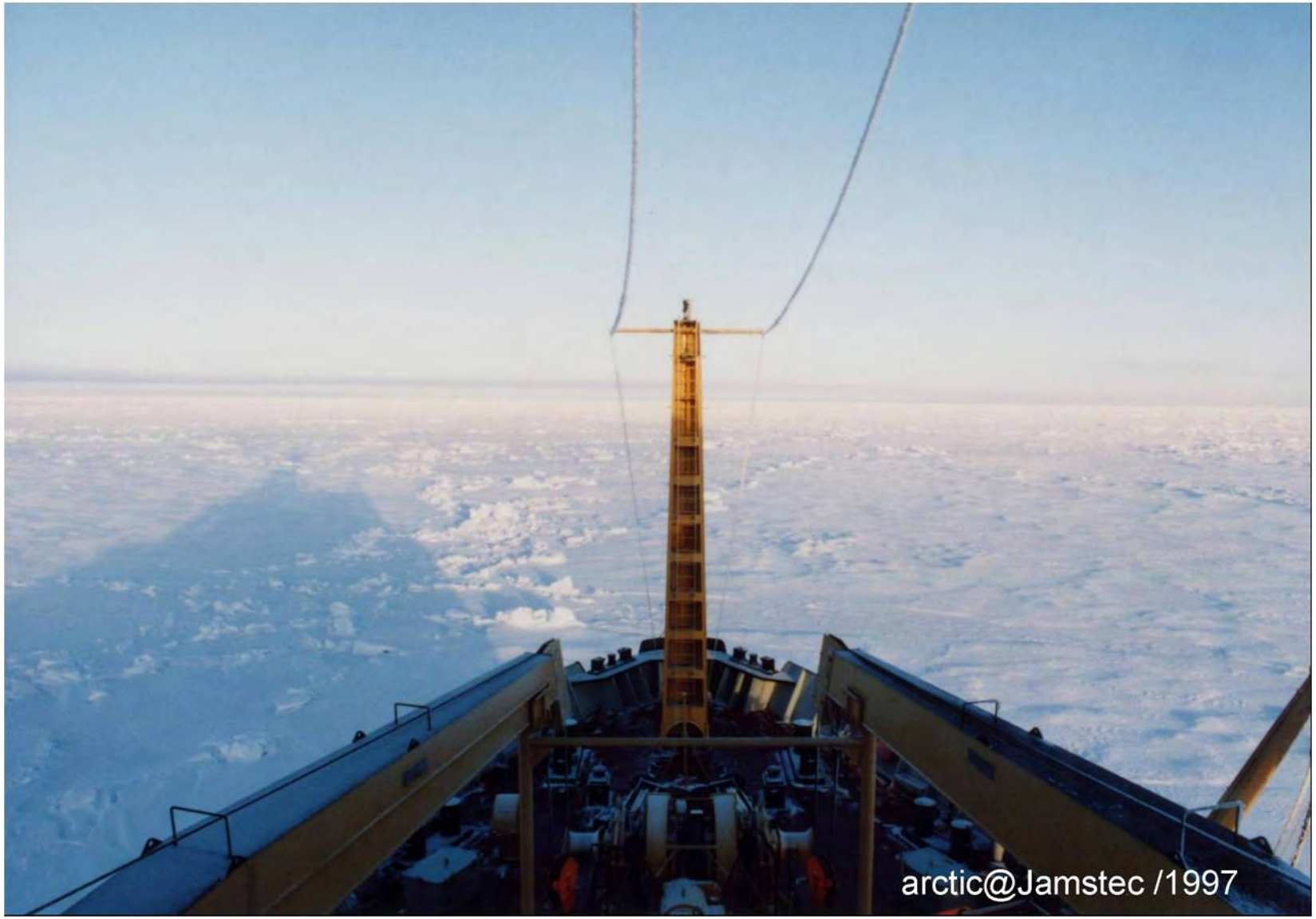
（出典：JRC/IPTS，POLESモデル結果（p.12)から作成）

（4）温暖化への適応：夢の北極海航路の開拓

- 2007年、2008年、北極海の海氷は記録的に減少。
- 予測では、2050年の9月頃には無氷状態。しかし、最近の傾向は、海氷融解が大幅に早まる可能性あり。
- 北極海航路が実現すると、航路短縮により、海運物流の大幅な省エネが可能になる。
- それは何時か？　どんな悪影響があるか？

出典：映画；, 北極のナヌー

約10年前の1997年の北極海の海氷状況



（出典：JAMSTEC北端秀行氏より提供）

10年後の2007年の北極海の海氷状況

（出典：JAMSTEC北端秀行氏より提供）

2008年、2つの航路上で無氷状態（記録的）

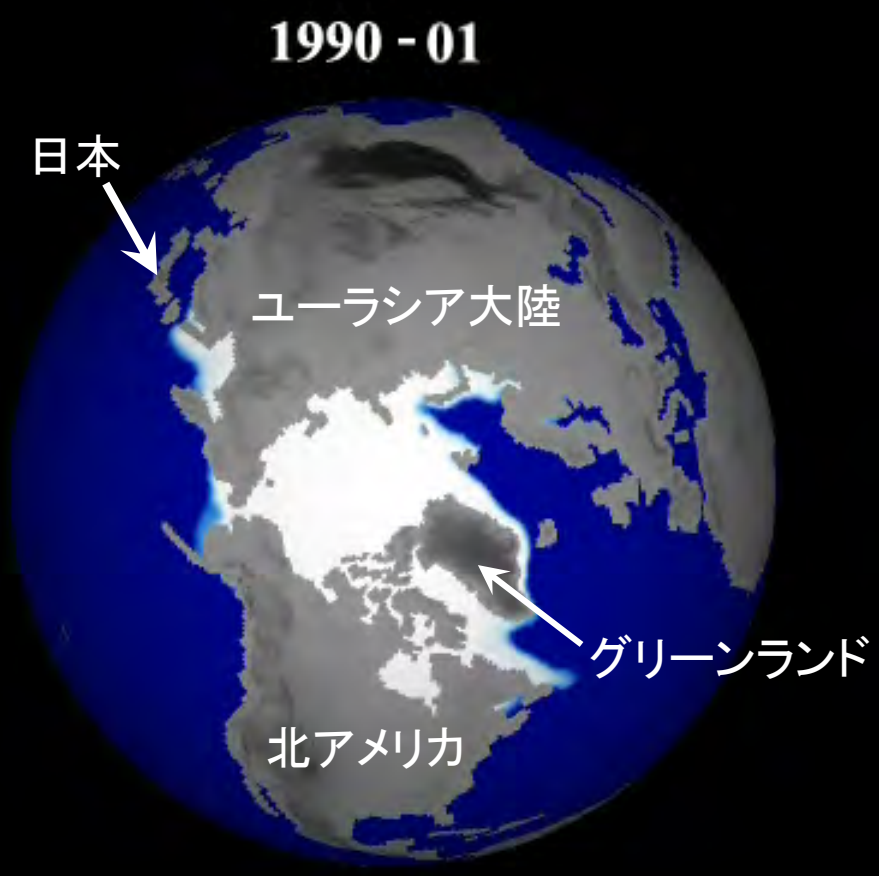
海氷体積＝密接度（海面に占める海氷面積比率）×厚さ

観測では、密接度が10～15%以下のとき無氷状態と見なす

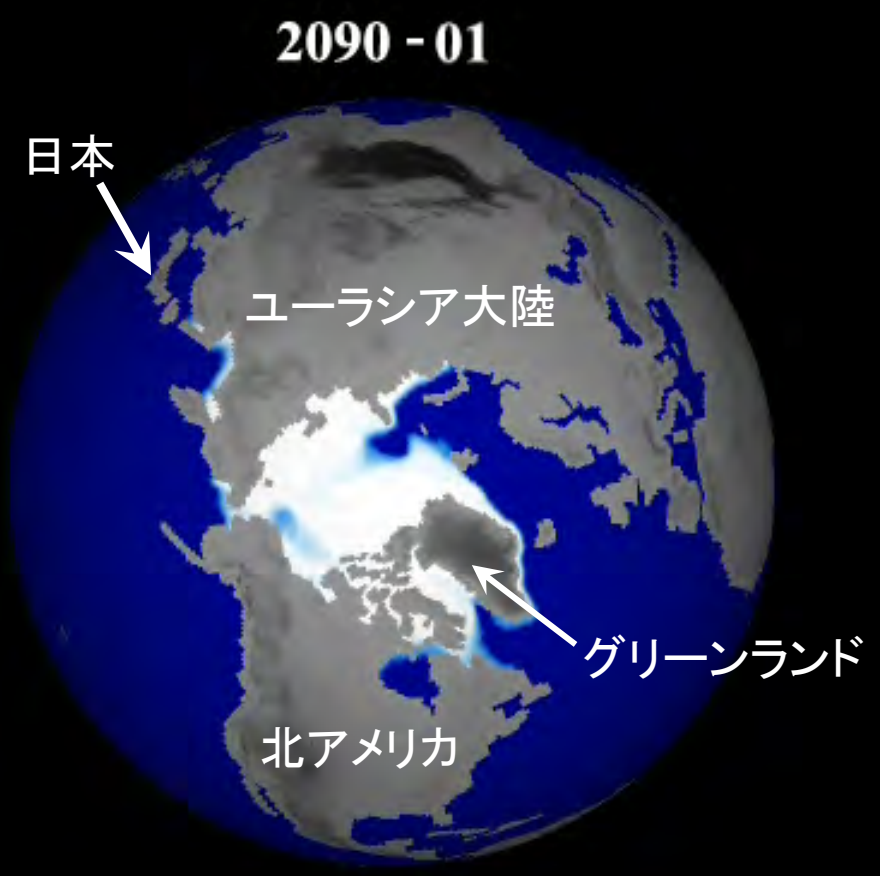
(出典：International Arctic Research Center/JAXA,2008年9月9日）

北極海の海氷減少の予測(A1B:中排出)

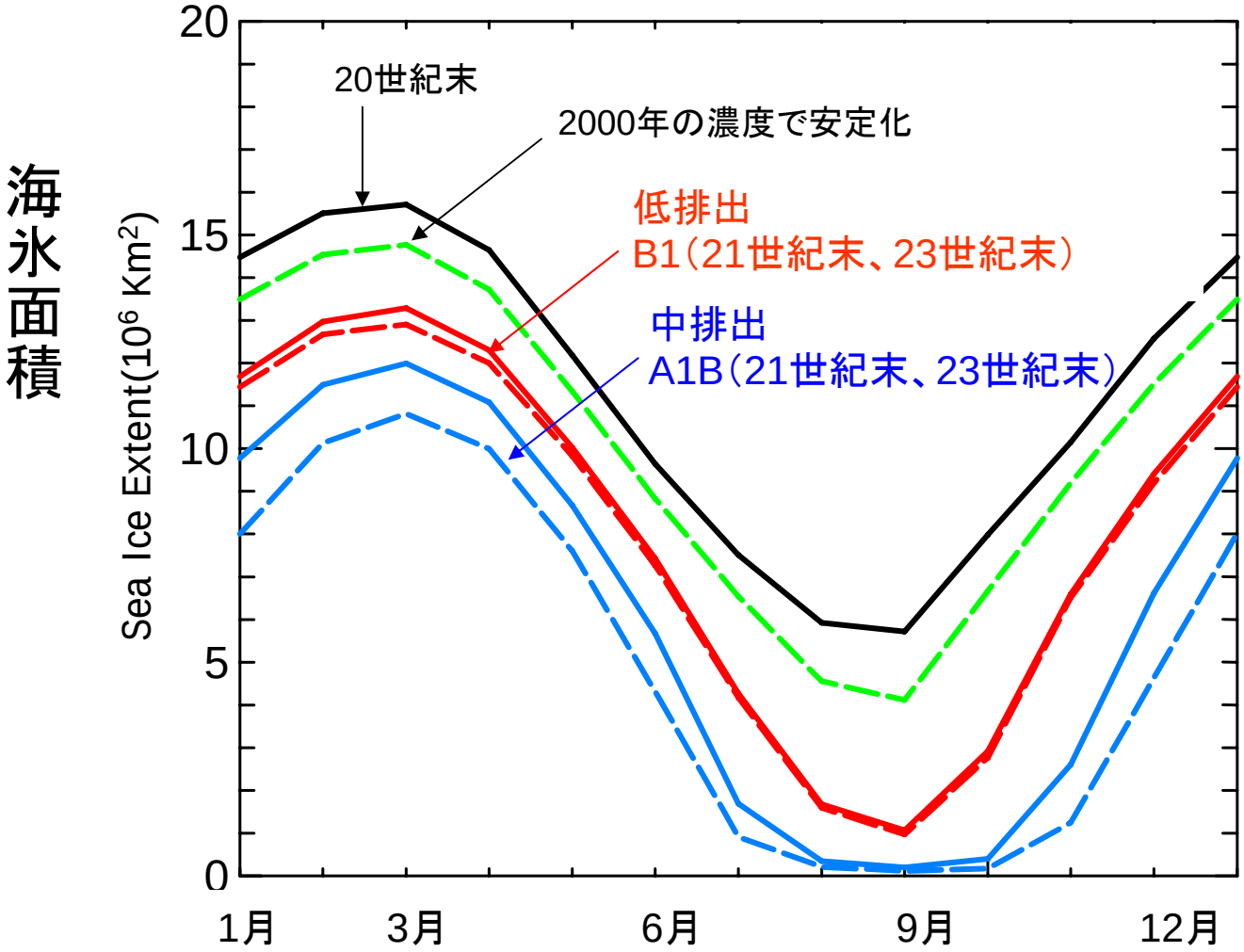
1990年代



2090年代 (A1B)



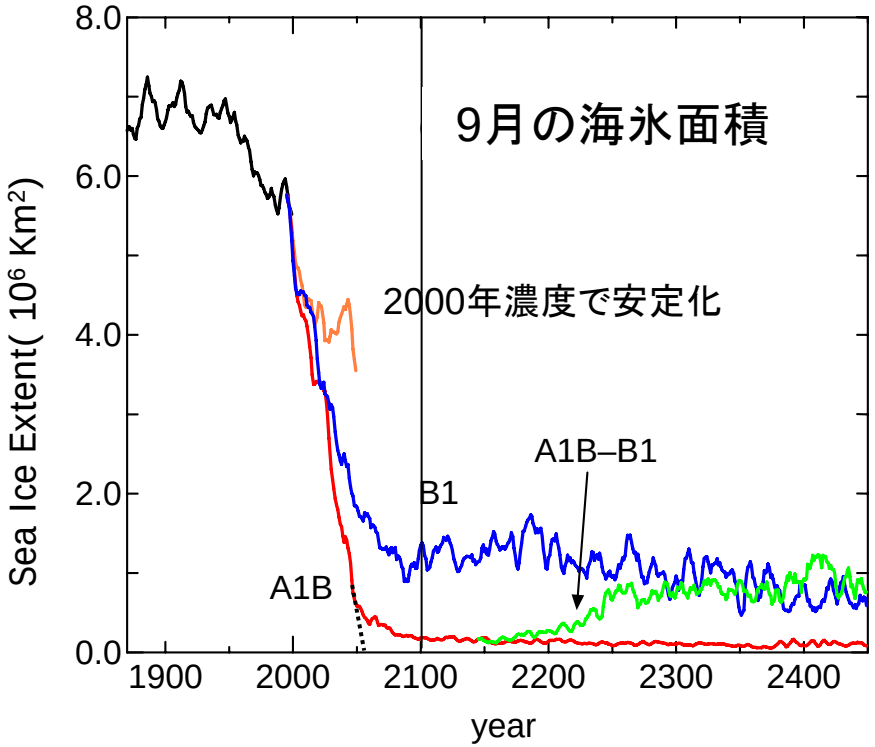
海氷の季節変化:9月の面積が最小



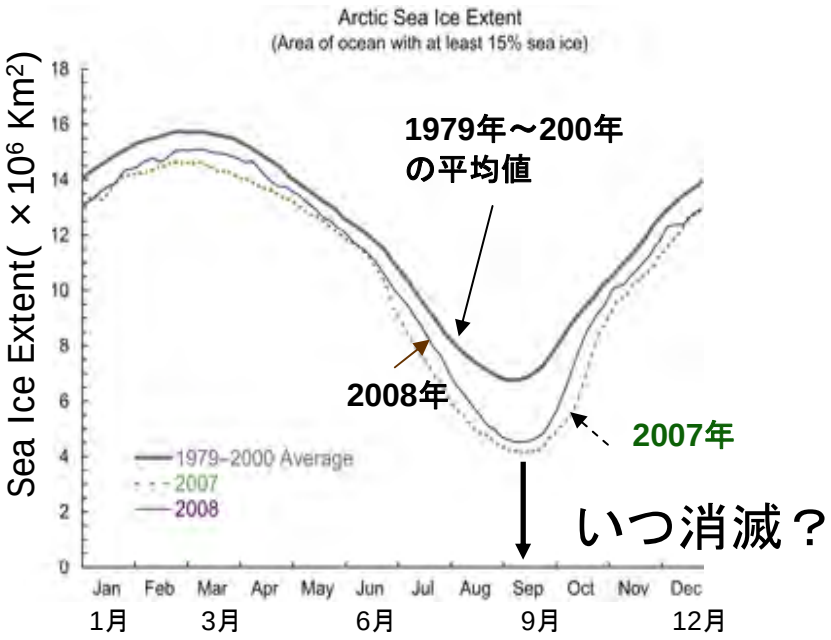
(出典:電中研報告V07001)

夢の北極海航路はいつ実現するか？

海氷融解の予測精度向上には、ベーリング海峡（幅50km、深さ50m）からの海水流入を表現できる高解像度モデル（10km）と超高速スパコンが不可欠



（出典：電中研報告V07001）

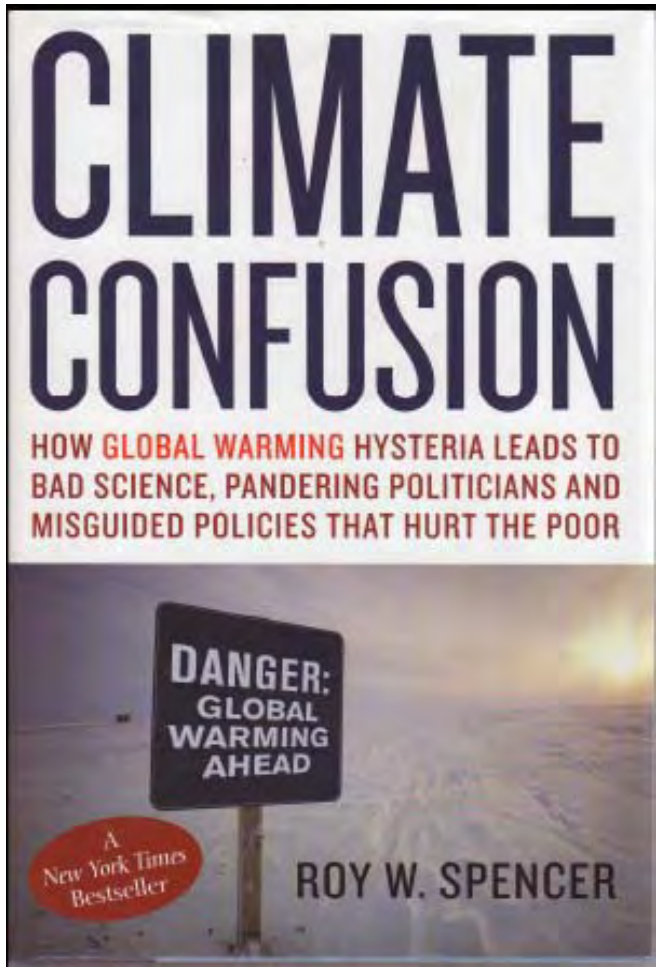


(出典：NSIDC, http://www.nsidc.org/arcticseaicenews/)

北極海の海氷面積（9月）の予測結果：
A1Bシナリオでは2050年頃消滅

→ 北極海の海氷面積（9月）は記録的に減少したので、2050年以前に消滅か？

結論：冷静な議論を！



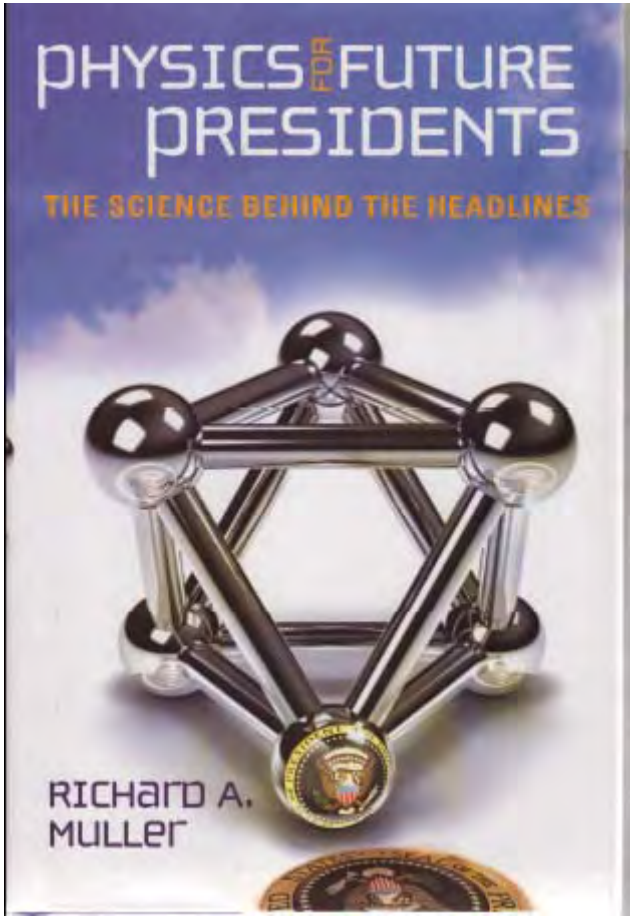
ニューヨークタイムス・ベストセラー

温暖化現象にはわからないことが多い。しかし、科学は着実に進歩している。最新の結果が最良

↓

温暖化ヒステリーは、悪意ある科学を生み、政治家を喜ばせ、政策を過たせ、その結果、貧乏人が傷つく。

政策に科学知識が不可欠な時代



未来の大統領たちの
ための物理学

ヘッドラインの背景にある科学

R. A. Muller,
米国、バークレー校の教授。
本書は、文科系学生向けの教育
コースの授業をまとめたもの。