

地球温暖化問題の科学 と総合的対応の必要性

独立行政法人海洋研究開発機構
松野 太郎

講演のアウトライン

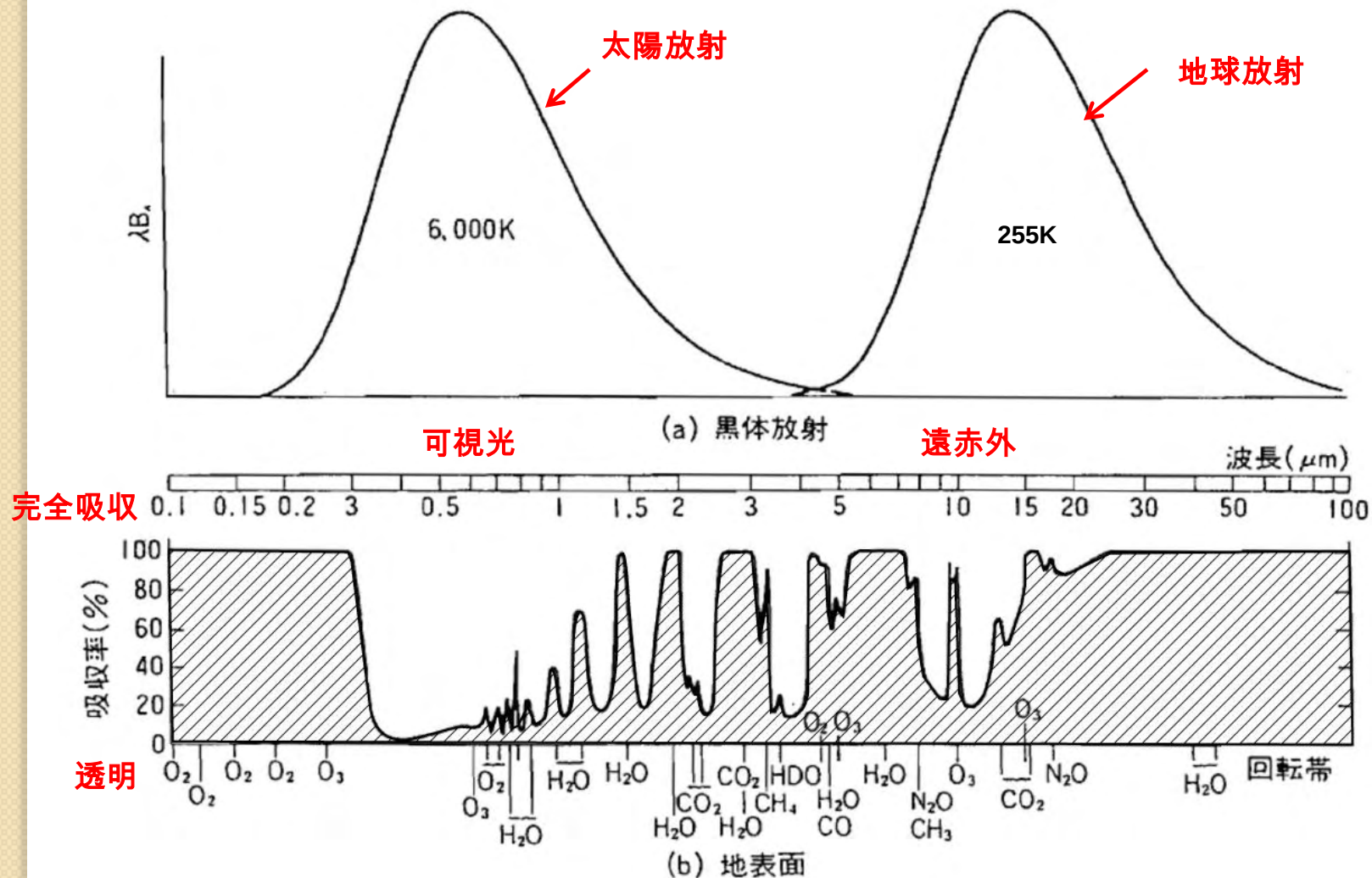
- I. 地球温暖化の理論と観測そして「懐疑論」の問題点
- II. 気候変化の予測
 - IPCC第4次報告書
 - 地球シミュレータを使った日本での予測研究
- III. CO₂排出削減と安定化について
 - ー 科学・工学の協力による総合的対応を



I. 地球温暖化の理論的基礎

地球温暖化の理論

太陽放射と地球放射のスペクトルと大気層の吸収率

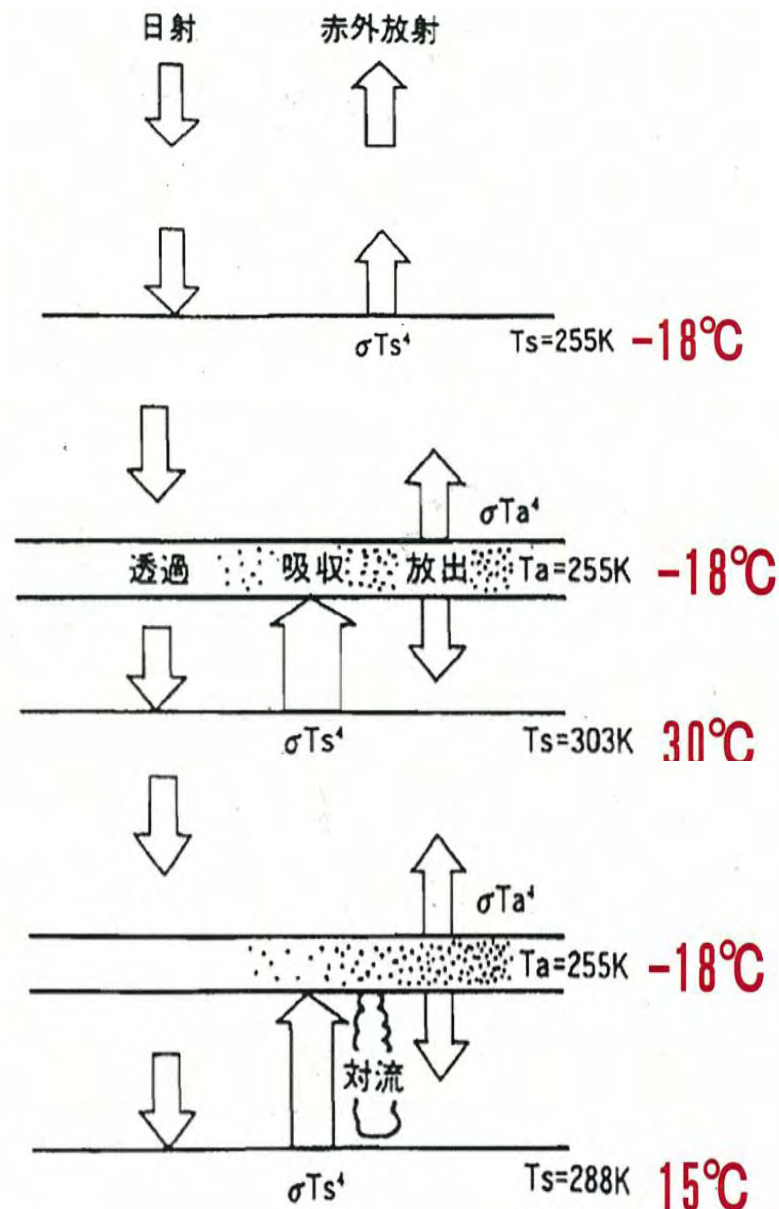


全大気層の吸収率

温室効果

地球と大気のエネルギーバランスを考える

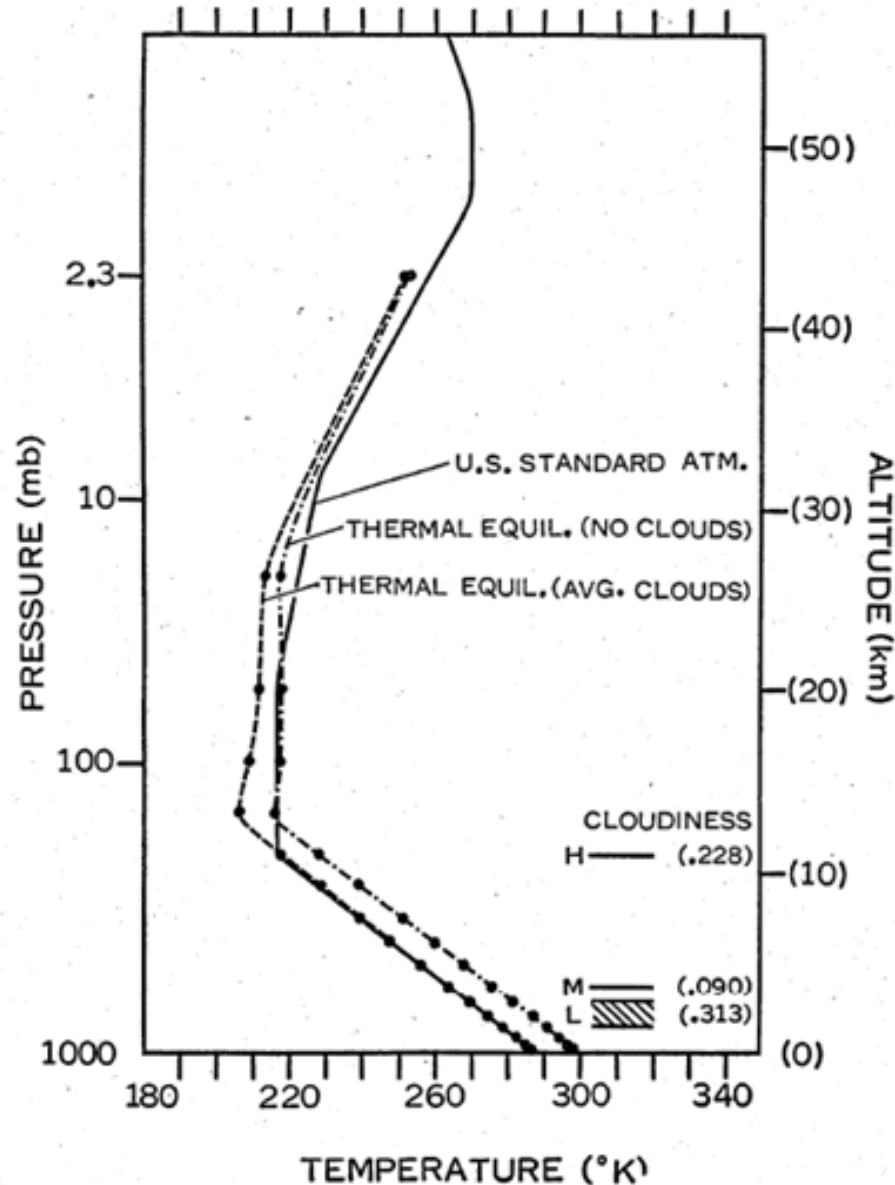
- もし大気がなければ
- 大気層は日射(可視光)に対して透明
- 熱放射(赤外線)に対して不透明
- 不安定になると対流が発生して熱を輸送、温度差をやわらげる
- 大気(温室効果)のおかげで33°C高温に



放射対流平衡理論(Manabe and Strickler, 1964)

地球大気の温度分布は何故このようになっているか？

気象学の古典的問題に対する最初のそして決定的理論



放射・対流平衡における各成分の役割

◆CO₂が無かったら地表温度は10°C低い(温室効果全体では33°C)

◆成層圏の高温はオゾンによる紫外線吸収のため

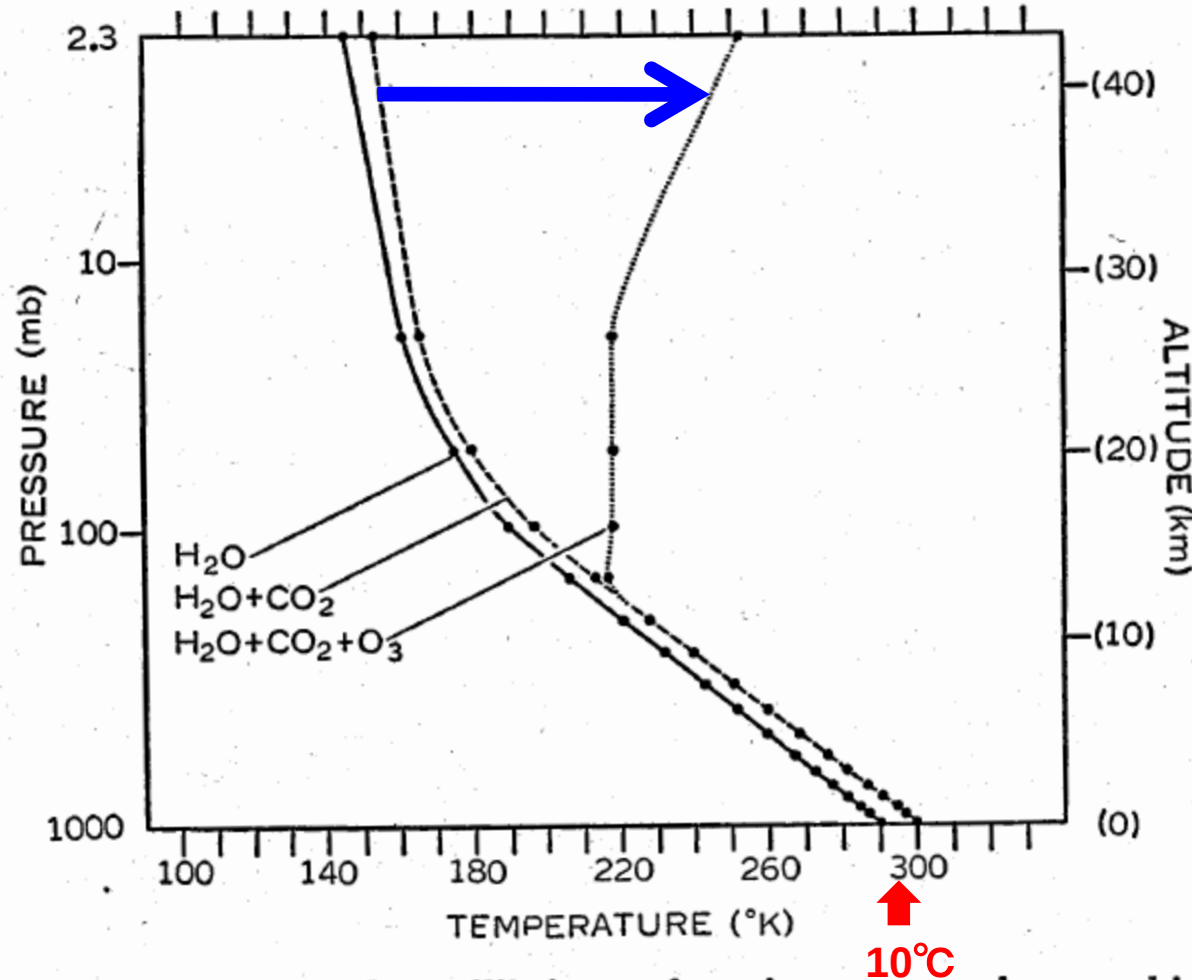


FIG. 6c. Thermal equilibrium of various atmospheres which have a critical lapse rate of 6.5 deg km^{-1} . Vertical distributions of gaseous absorbers at 35N, April, were used. $S_e = 2 \text{ ly min}^{-1}$, $\cos \bar{\zeta} = 0.5$, $r = 0.5$, no clouds.

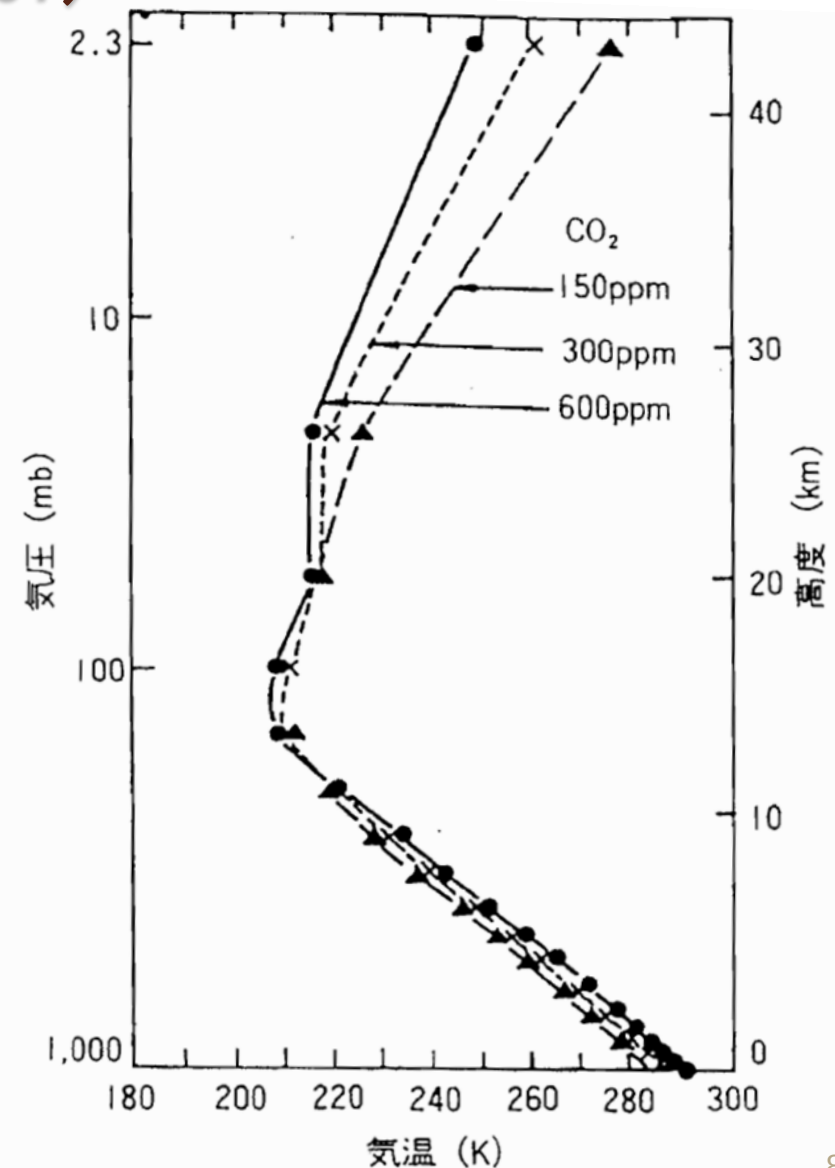
放射・対流平衡に基づく温暖化理論 Manabe & Wetherald (1967)

CO₂濃度を変えた時の平衡温度 (地表面)の変化

CO ₂ 濃度 (ppm)	水蒸気量 固定	相対湿度 固定
150	289.80	286.11
300	291.05	288.39
600	292.38	290.75

1.33 2.36

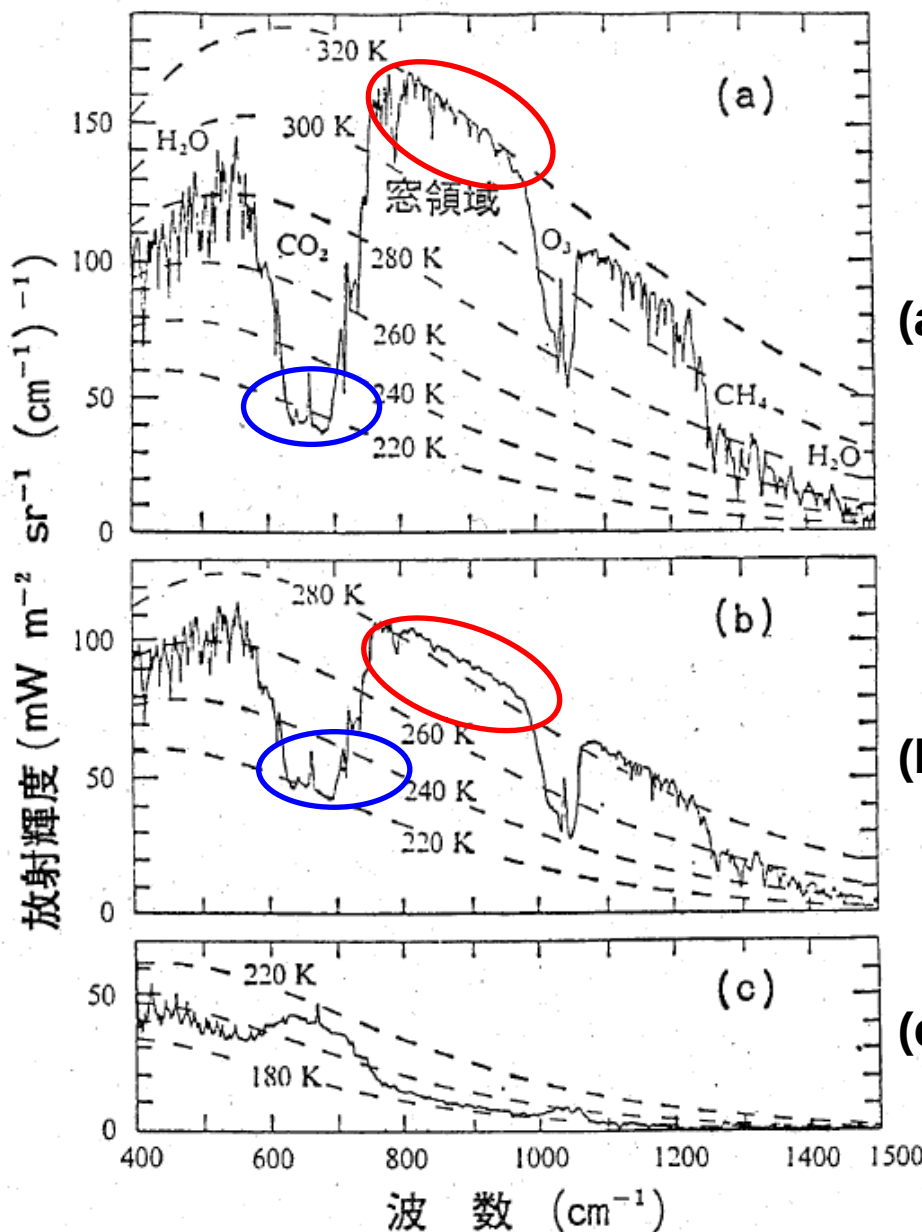
CO₂ 2倍により2.4℃高温に
(相対湿度不変と仮定)





地球放射のスペクトルから見た 温室効果と「放射強制力」

人工衛星で観測された地球放射(赤外)のスペクトル



吸収のない波長では
高温の地表面から赤
外線が流出 (赤色)

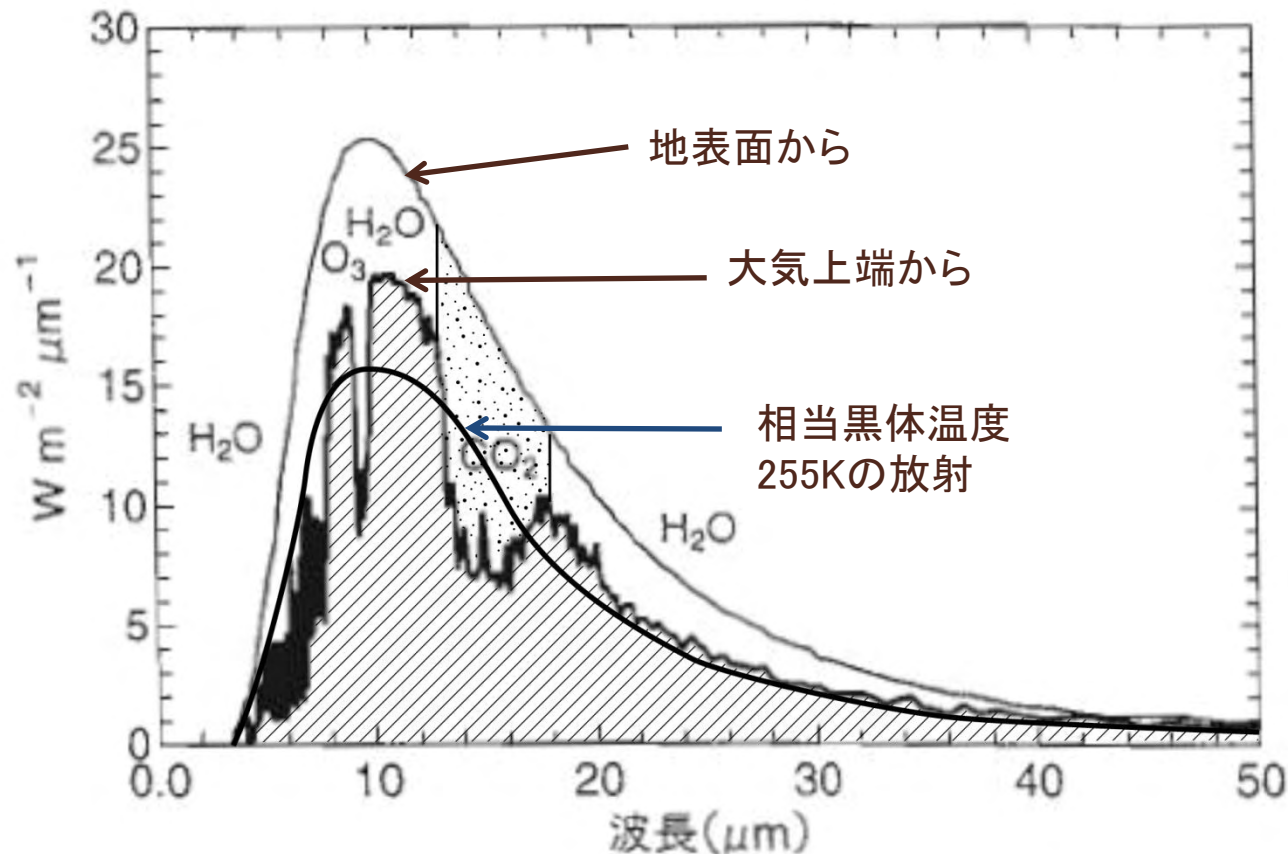
CO_2 の強い吸収帯では
上空の低温度の赤外
線が流出 (青色)

南極では地面(氷面)
が極低温で上空の方
が高温

スペクトルから見た温室効果

全地球平均の外向き赤外線放射スペクトル

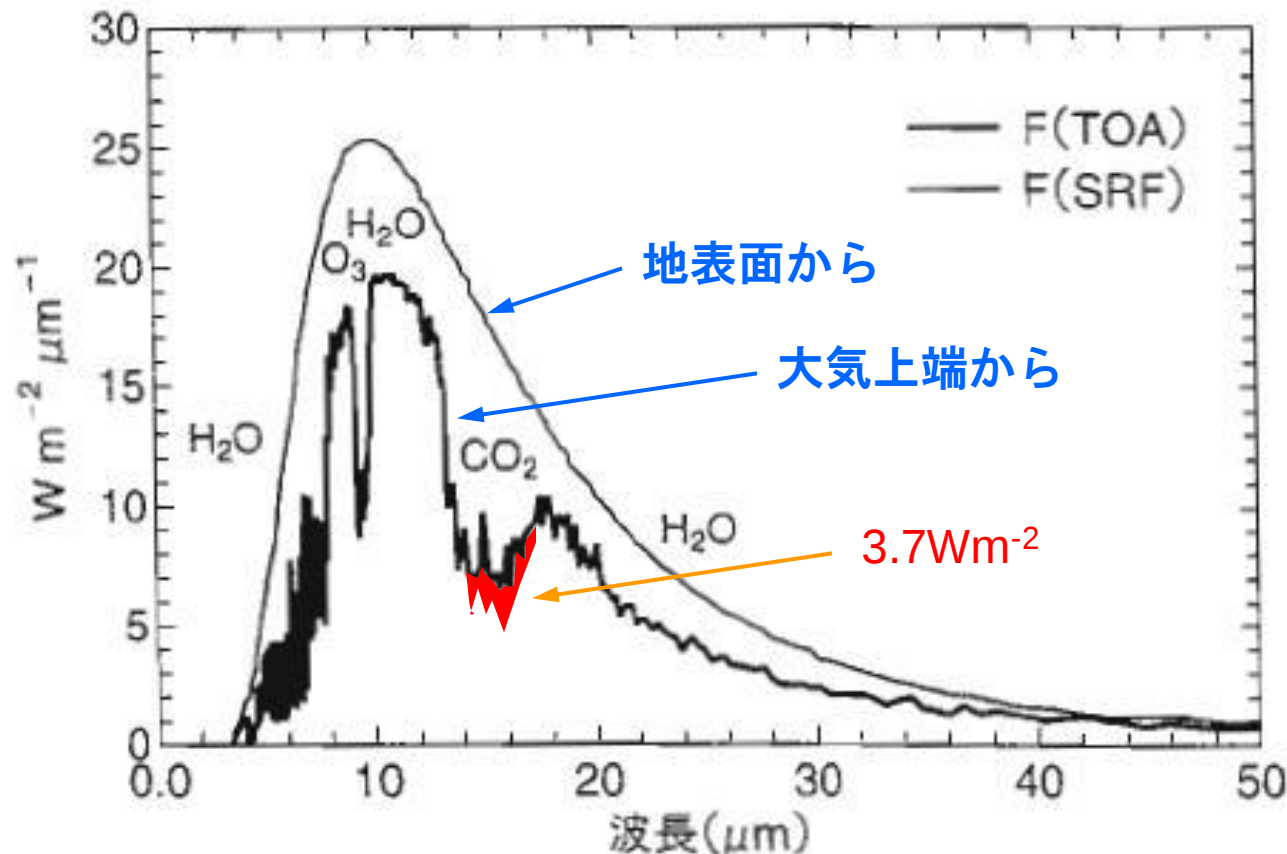
(Kiehl and Trenberth, 1997より)



- ・ 大気上端からの全放射量は地表面からの放射の約60%
→ 温室効果
- ・ CO_2 の効果は全温室効果(2つの線の間の面積)の20~25%

CO₂2倍の放射強制力と温度上昇

CO₂が2倍になると15μm帯の放射(大気上端)が3.7W/m²減少

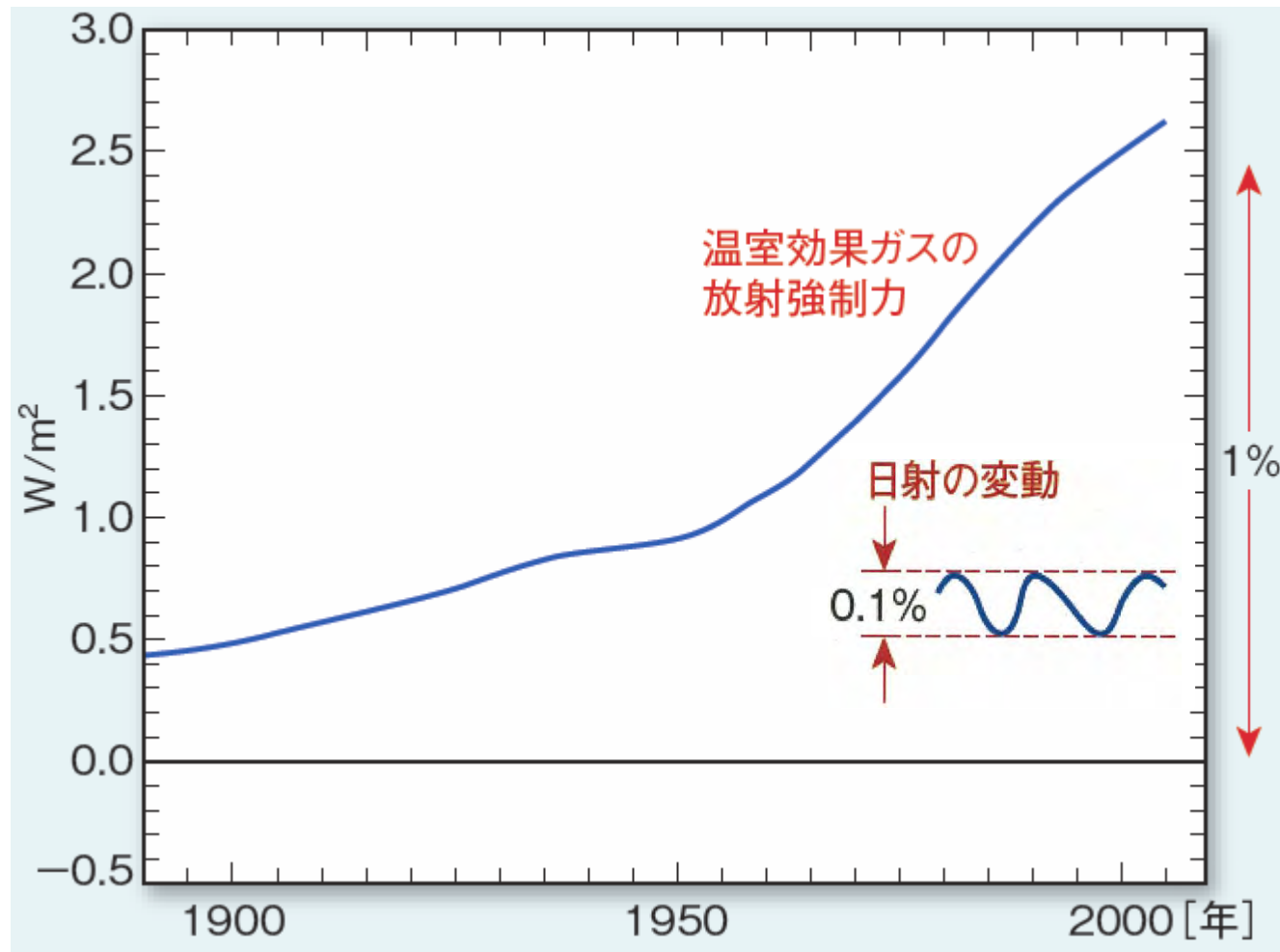


エネルギー流出が減少 → バランスがくずれ加熱

→ 地表面が高温に → 約1.3K高温でバランス [→ 水蒸気増加

→ H₂Oによる温室効果 → さらに高温(1.9~2.4K)でバランス]

全温室効果ガス増加による放射強制力 (加熱効果)と日射強度変化の比較

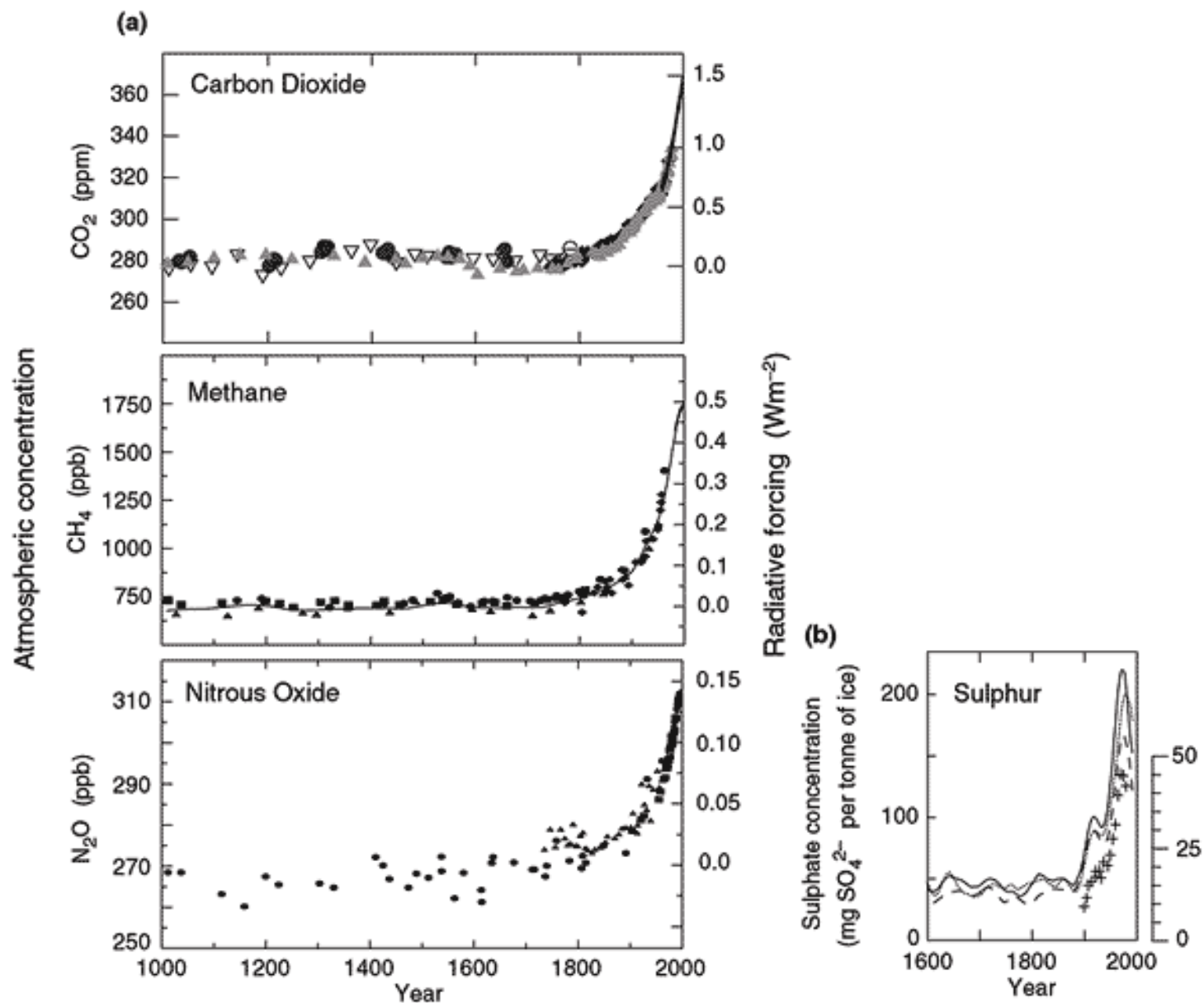


観測された各ガス濃度と物理法則のみで決まり揺るがしがない



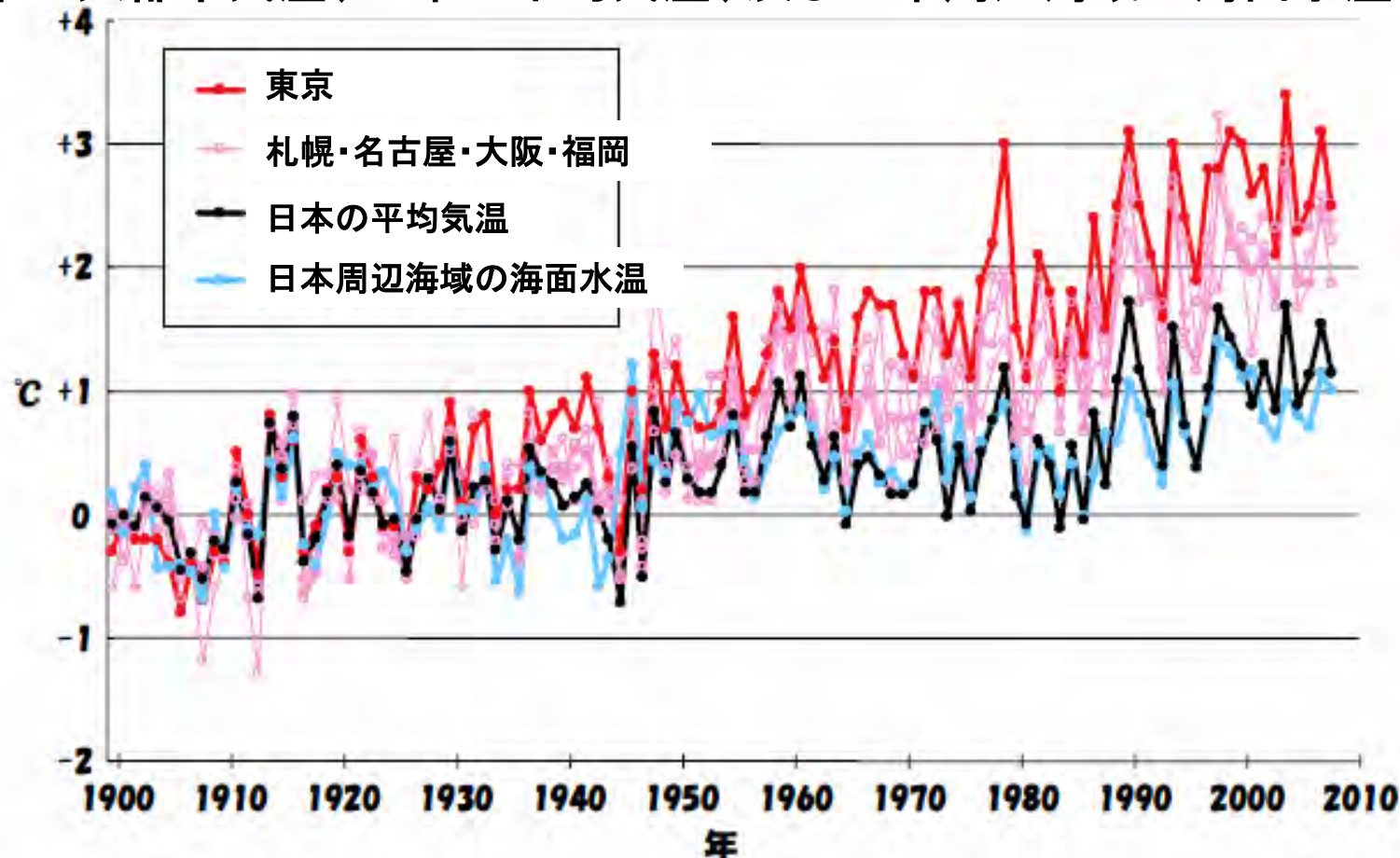
温室効果ガスの増加 と 気温の変化

氷床コア観測と現代の観測による温室効果ガスの変化



都市化(ヒートアイランド)の効果

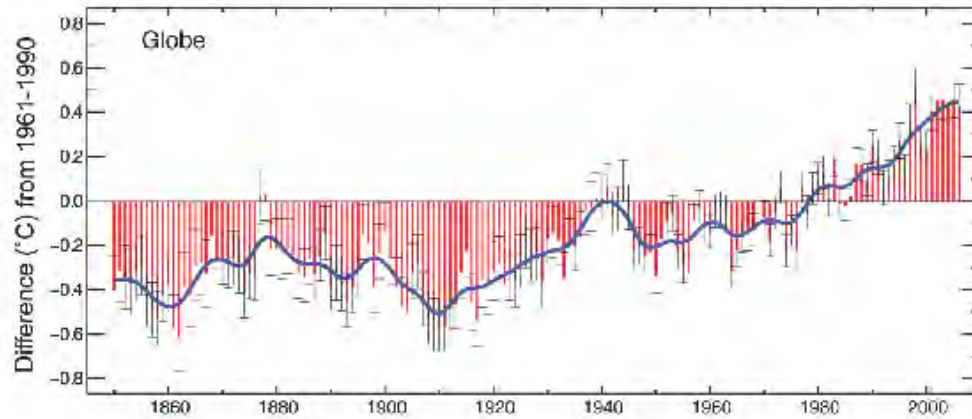
日本の大都市気温、日本の平均気温、及び日本周辺海域の海面水温の推移



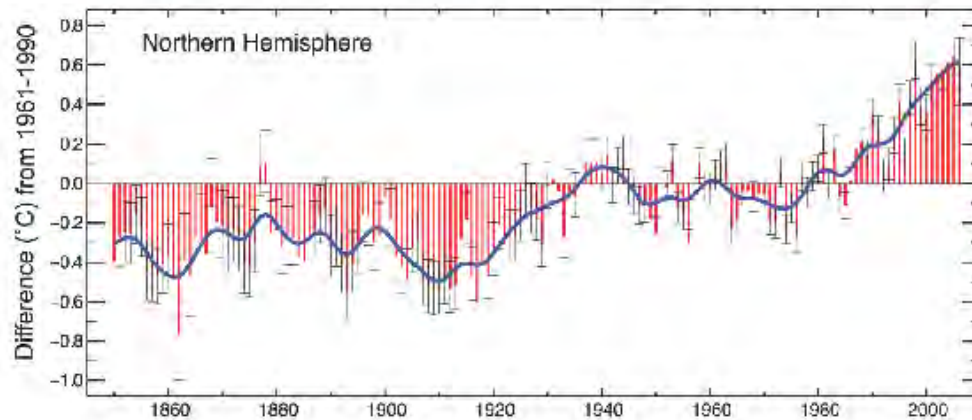
日本の平均気温は国内17地点(図3.1.1)の平均。いずれも年平均値で、1901～1930年の30年平均値からの差。

算出に用いた地点は以下のとおり。北日本(網走、根室、寿都、山形、石巻)、東日本(伏木、長野、水戸、飯田、銚子)、西日本(境、濱田、彦根、宮崎、多度津)、沖縄・奄美(名瀬、石垣島)

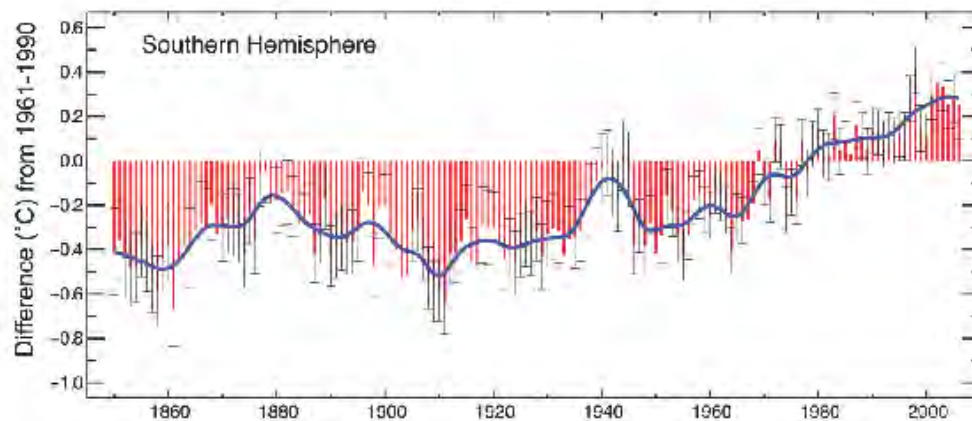
1850年以降の地表気温の変化



全地球

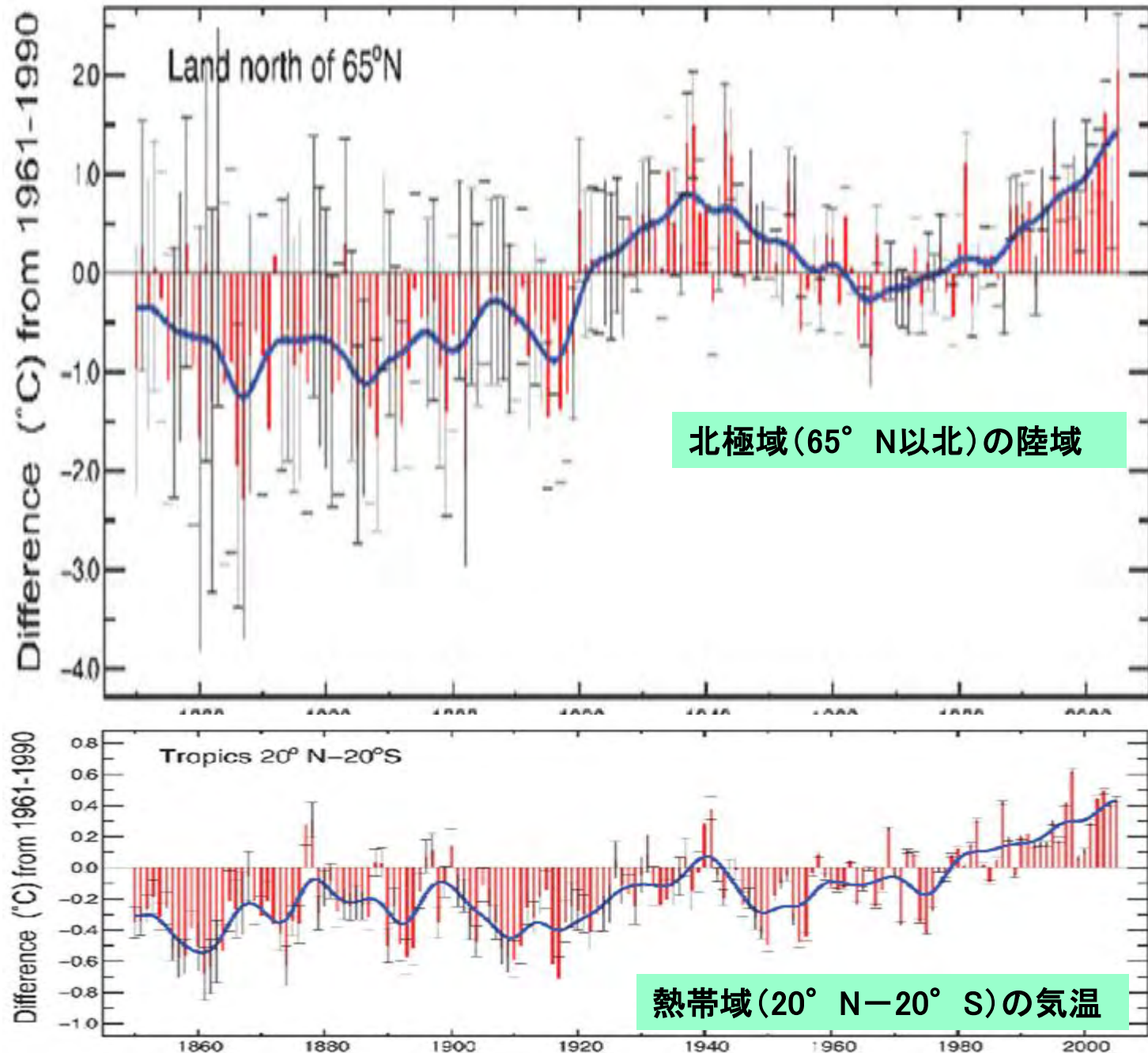


北半球



南半球

北極域の気温変動は大きい(面積は小) 温度スケールに差あり



地球温暖化メカニズム基礎理論のまとめ

- 「温室効果」は、気体分子の赤外線放射に関する最も基本的物理法則の結果であり、理論、室内実験、野外観測により確立している。
- 温室効果は惑星の地表面高温を生み出し維持している鍵である。
- 温室効果により、地表温度は大気がなかった場合より 33°C 高温になっているが、 CO_2 の温室効果への寄与は20~25%程度に上る。
- 地球全体を対象とし、物理法則にもとづき大気温度の鉛直分布を扱った Manabe and Stricklerの理論(1964年)は、現実に関測される大気温度構造をみごとに説明している。
- その延長である CO_2 濃度が2倍/半分の場合の大気温度についての Manabe and Wetheraldの理論(1967年)は同じように確実な基礎に立つものである。
- 近年の太陽光が強くなっているという論に直接の証拠はない。1979年以降の人工衛星観測では、30年間に0.01%程度の変化しかしてない。
- もしも太陽光が強まったとするなら、成層圏の気温は上昇するはずなのに、現実にはこの40年余りはっきり下降傾向を示している。これは CO_2 増加およびCFCによる O_3 減少の効果として説明される。

温暖化懐疑論について

1. 温暖化そのものを否定

略 • 観測の不備

スミ • 都市化の影響

2. 「人間活動の影響」を否定

◆ CO₂増加は人間活動によるものではない

略 温暖化の結果としてCO₂増加(温暖化の原因は不問)

◆ 温暖化はCO₂増加によるものではない

スミ • 自然の変動の一環(特に北極域の変化)

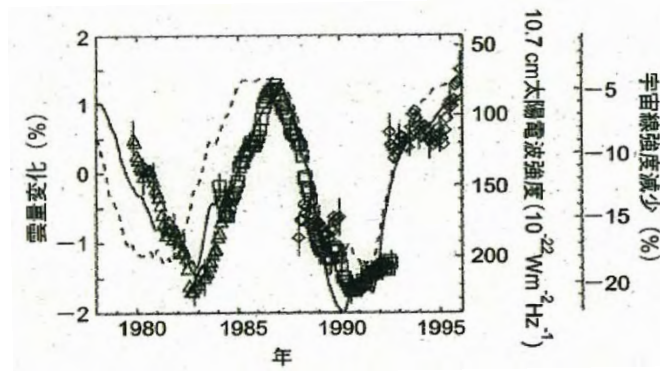
• 太陽活動の影響で温暖化

スミ 日射強度の増加(多くの間接証拠による)

これから 宇宙線の変化により雲量が変化(スベンスマルク)

スベンスマルクの主張

雲量と太陽活動相関

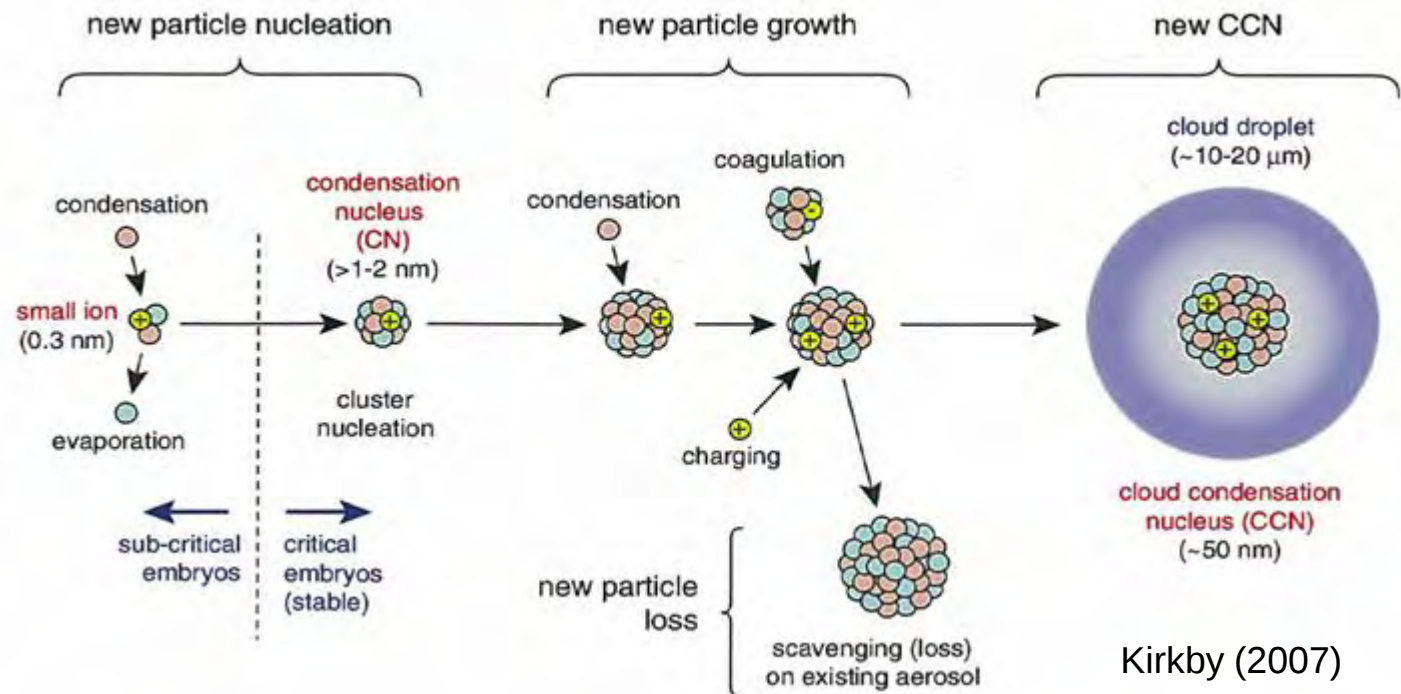


銀河宇宙線による雲生成の可能性

R.E.Dickinson (1975)による

一般に雲粒は、硫酸塩粒子などの微粒子が核となって微小核としてのエアロゾルが形成され、これに過飽和状態の水蒸気が凝縮してできる雲核ができさらに水蒸気が凝結し $10\mu\text{m}$ 程度に成長して作られる。

宇宙線による荷電は気体の硫酸分子・水分子が集合して超微小な核を作るのを助ける(出発点)



Kirkby (2007)

太陽活動の宇宙線への影響

太陽活動強（弱）→太陽風強（弱）、太陽磁場強（弱）
→銀河宇宙線侵入難（易）→宇宙線弱（強）

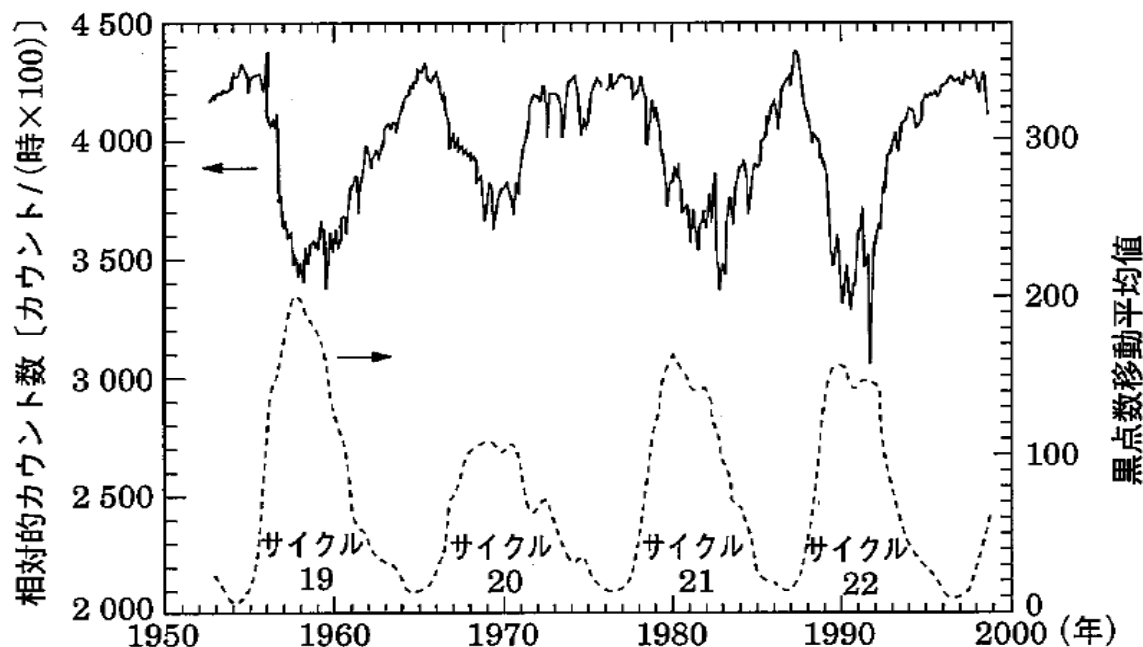


図 7・4 銀河宇宙線の強度変化と太陽活動には逆相関がある。
銀河宇宙線に関しては地上における中性子線の強度変化（左側の縦軸はクライマックス観測所における相対的なカウント数）を示す。太陽活動に関しては黒点数の変化（右側の縦軸は黒点数の移動平均値）を示す（データは米国商務省海洋大気庁国立地球物理データセンター発行の太陽地球物理学データ速報より）

Svensmarkメカニズムの各ステップでの疑問

◆ 宇宙線強度が増大したとして雲量は増えるか？

(1) イオンは H_2SO_4 ガスから1～3nmの凝結核(CN)生成を促進するか？

- 類似メカニズムでイオンのかわりに有機物を介在させた実験 (Berndt, 2005) は成功
- Svensmark自身による宇宙線＋放射性物質(γ 線)を用いた実験は期待を否定 (Svensmark et al. 2007) [議論、結論あいまい]
- CERNでの予備実験では他の物質の混在で結論困難 (2010)
- CERNでの本実験でイオンだけでは不十分、 NH_3 や有機物が重要とわかった (2011年8月)

(2) 既存の大粒径エアロゾルとの競争に勝って雲核(CCN)、雲になれるか？

宇宙線は長期的に減少しているのか？ 否

短期変動（黒点11年サイクル）も含め2009年は史上最大

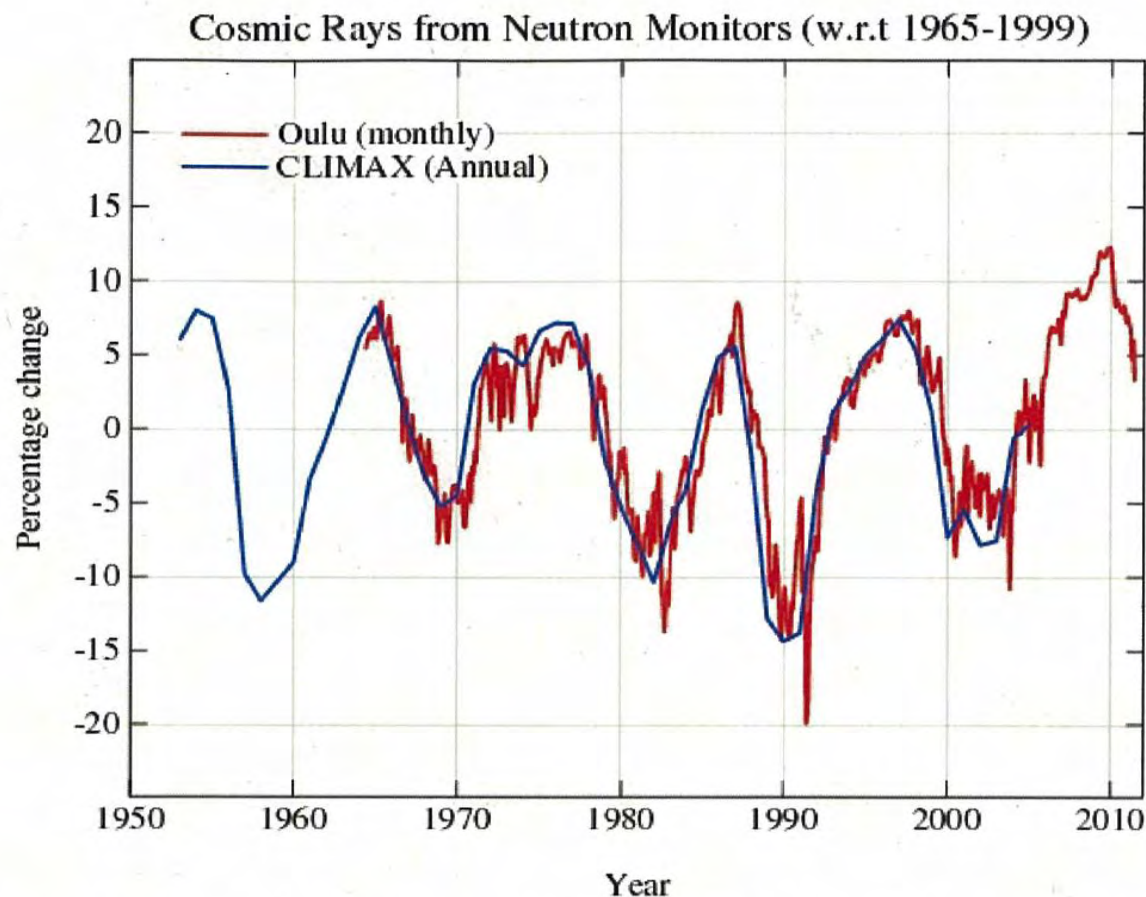
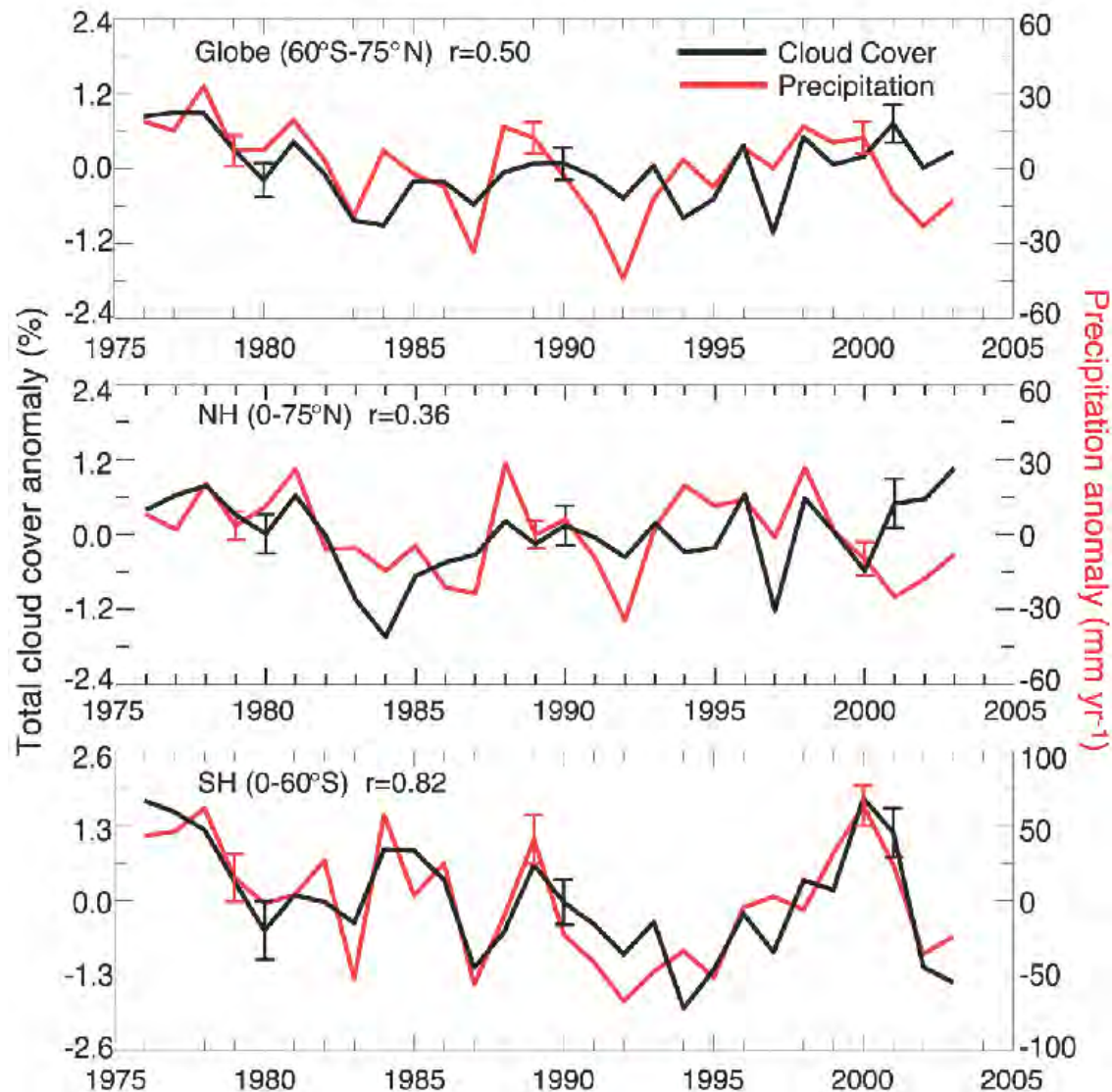


Figure 2: Normalised changes in cosmic rays since 1953. There has not been a significant downward trend. The exceptional solar minimum in 2008-2010 stands out a little.

Real Climateより

雲量は減っているか？ 否

近年の雲量の変化 (IPCC AR4, Dai et al. 2006)



懷疑論の誤りの主要ポイント

温暖化(地球全体を加熱)の理論的基礎に全く反論していない

- CO₂の増加は観測事実
- 分子の赤外放射特性と物理法則(放射伝達方程式)の直接的帰結

→放射強制力の理論的基礎やManabe and Wetheraldはじめ論文の誤りを指摘すべき

CO₂増による放射強制力(=加熱効果)は物理法則により否定できない。太陽活動活発化など、他の原因の有無には無関係に仿っている。

太陽活動原因論で温暖化を説明し、CO₂増加によるものではないと主張すれば、放射強制力の存在(物理法則とその量的見積もり)を否定することになるが、そのことにまったく言及していない

→論理的にそうなる事に気付いていない

懐疑論の立場・物の見方

温暖化「理論」ではなく温暖化「説」としての扱い

- 全球平均温度の上昇(変化曲線)を何で説明するか
 - 関係のありそうな物理量(例:黒点周期長)との並行性のみ想定する昇温機構に直結する観測データなし
 - 「温暖化」を離れ気象、地球に関する別の問題に移行(極めて薄弱な結びつけ)(例:宇宙線と雲)

異分野科学者が自分たちの物の見方で議論

- 地質学・固体地球科学
 - 複雑な地球現象に関して物理法則から「厳密科学的」に演繹は不可
 - 観測データにもとづく相関解析と帰納こそ真
- 超高層大層大気・宇宙空間科学
 - 太陽の影響は大きいはず
 - 関係ある量との変化(グラフの曲線)の類似性は因果関係を示す。(比較的単純なシステムで物理機構がわかっていれば成り立つ)

科学的理解の総体性(多くの事実が相互に矛盾なく説明される)を無視、わかりやすい個別事例で異論提出 → 一般受け

CO₂温暖化否定ならば何でもよい → 同一著者(同一著書)でさえ内部矛盾

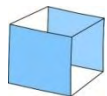
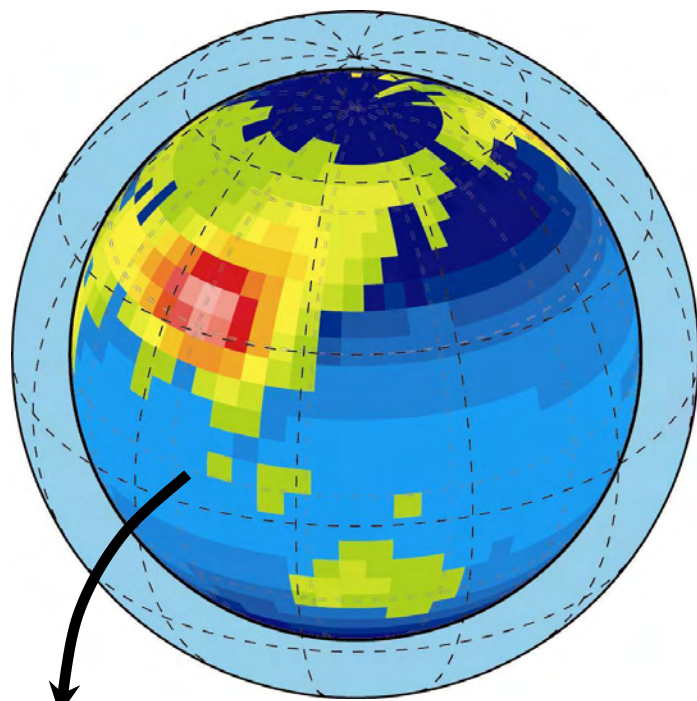


II. 気候変化の予測

気象(数値天気予報)のモデル

大気・海洋・陸面を3次元の
格子に切る(離散化)

各格子点での物理量の変化を
流体の方程式に従い計算する



$U, V, p, T, q, \dots$

各格子で物理量を定義

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

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

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

$$0 = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z}$$

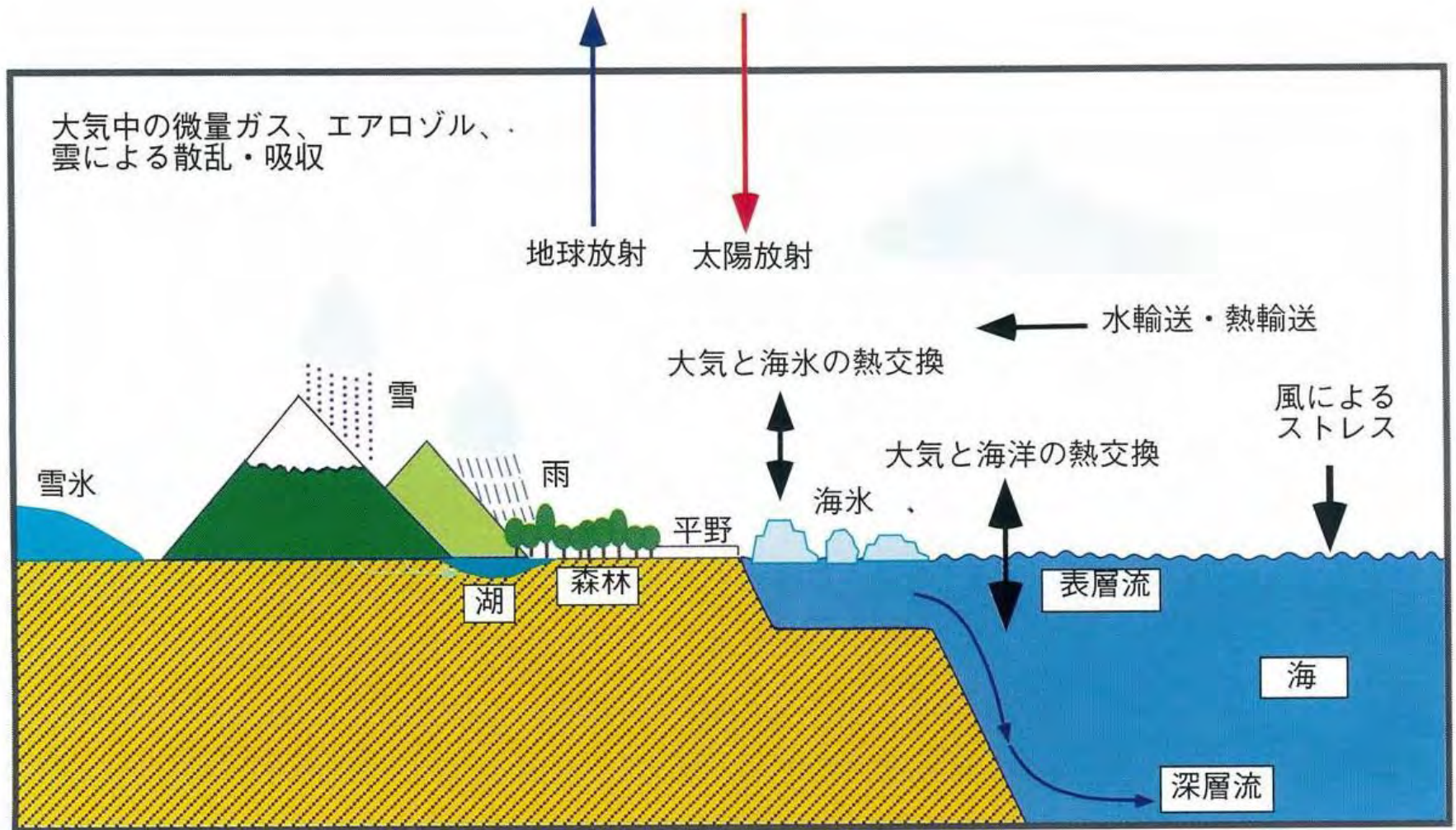
$$c_v \frac{dT}{dt} + p \frac{d\alpha}{dt} = Q$$

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

$$p = \rho RT$$

気候システム

「気象」の平均である「気候」には、大気に加え海洋、陸域の変動が影響する



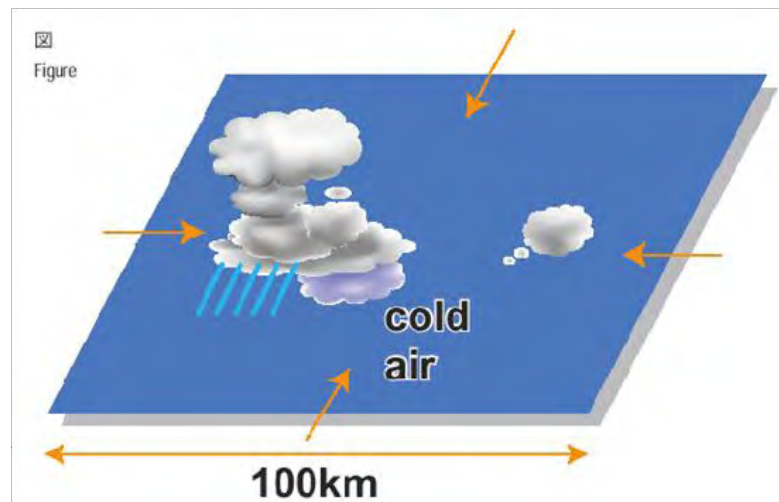
パラメタリゼーション(対流雲)

これまでの天気予報・気候モデル 格子間隔～100km

- 温帯低気圧や前線の雲・雨は直接計算
- 格子より小さな対流雲(入道雲)
安定度 = $T(\text{上層}) - T(\text{下層})$
から対流雲の発生・雨量決定
→パラメタリゼーション

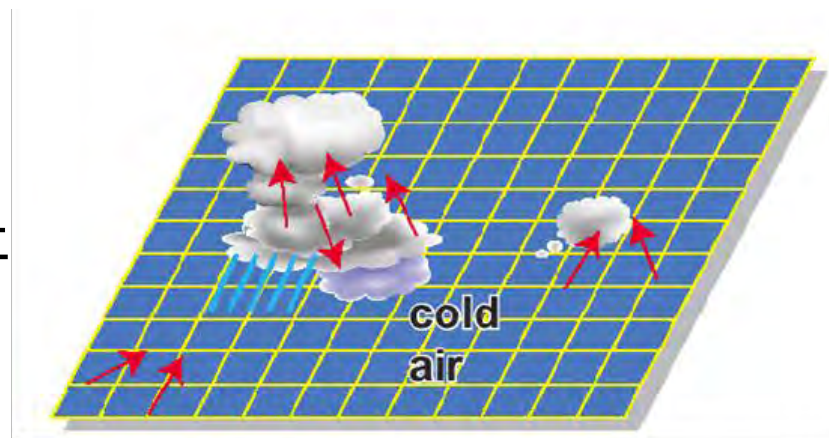
[天気予報]

上空に寒気が入って大気が不安定となり
所により強い雨が降るでしょう



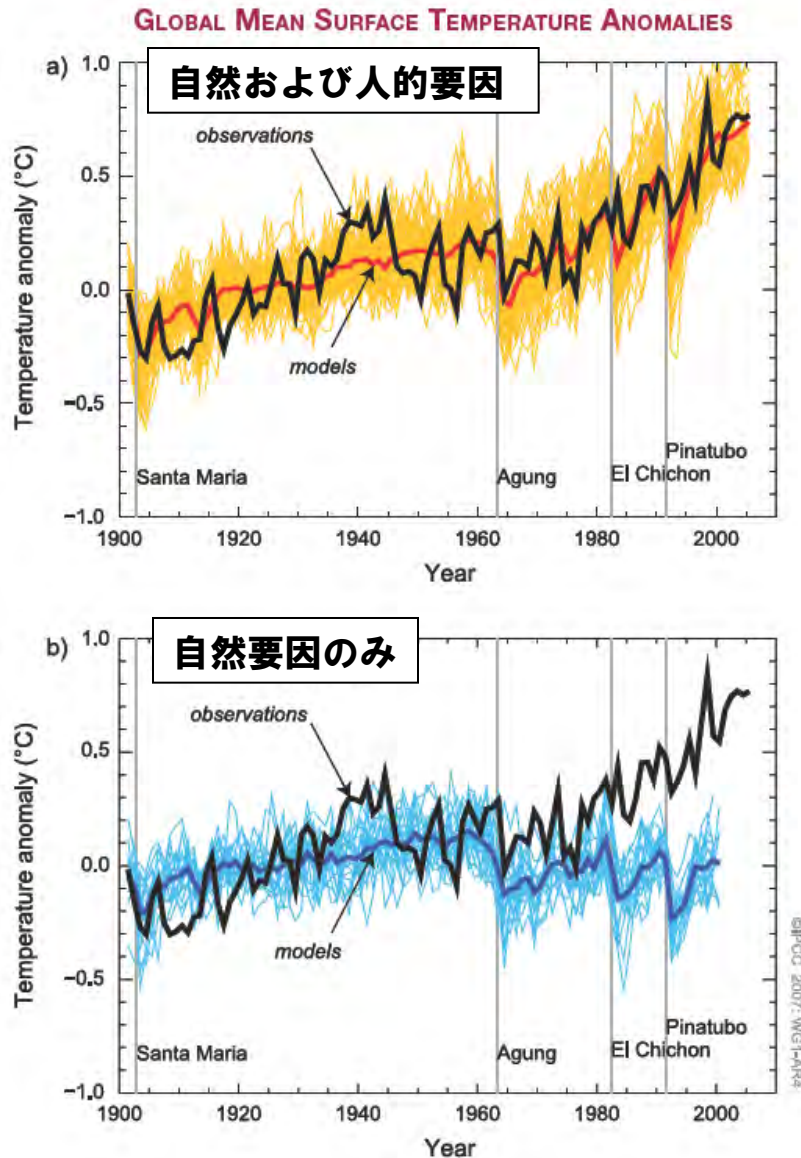
全球雲解像モデル (将来)

- 熱帯域の対流雲とその集団を格子を用いて直接表現 $\Delta x \leq 5\text{km}$
地球シミュレータを用いて初めて可能に
NICAM 2005年に完成 世界唯一



過去(20世紀)の気候変化の原因

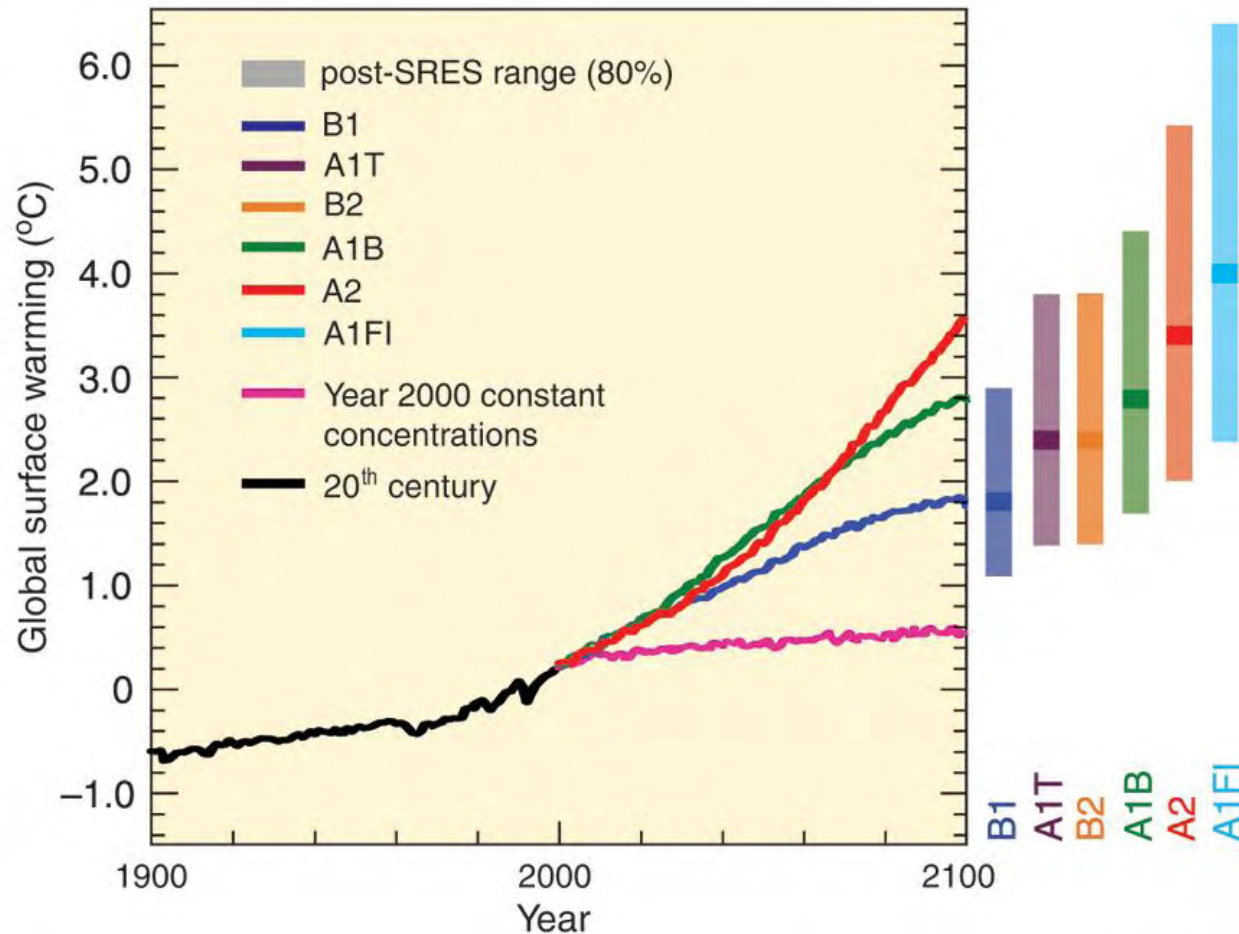
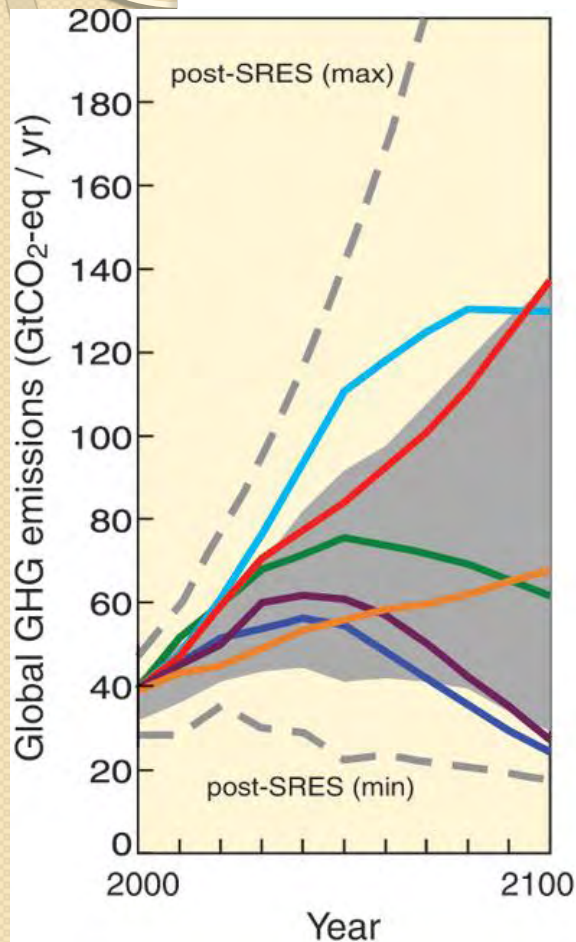
モデル実験による分析



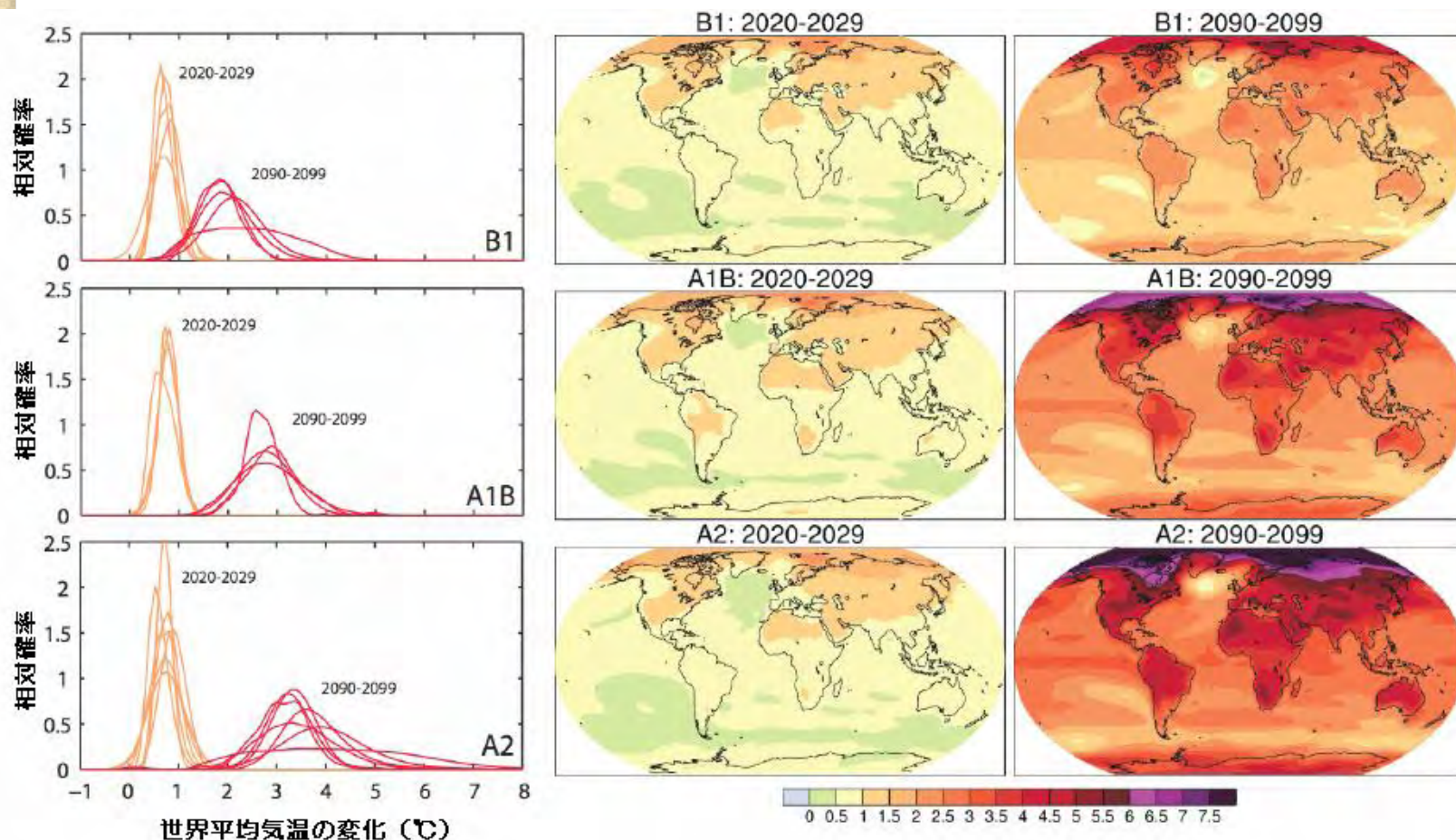
20 世紀半ば以降に観測された世界平均気温の上昇の大部分は、人為起源の温室効果ガスの観測された増加によってもたらされた可能性が非常に高い。これは、第3次評価報告書での「過去50 年にわたる、観測された昇温の大部分が温室効果ガス濃度の上昇によるものであった可能性が高い」との結論を進展させるものである。

■ 将来の気候の予測

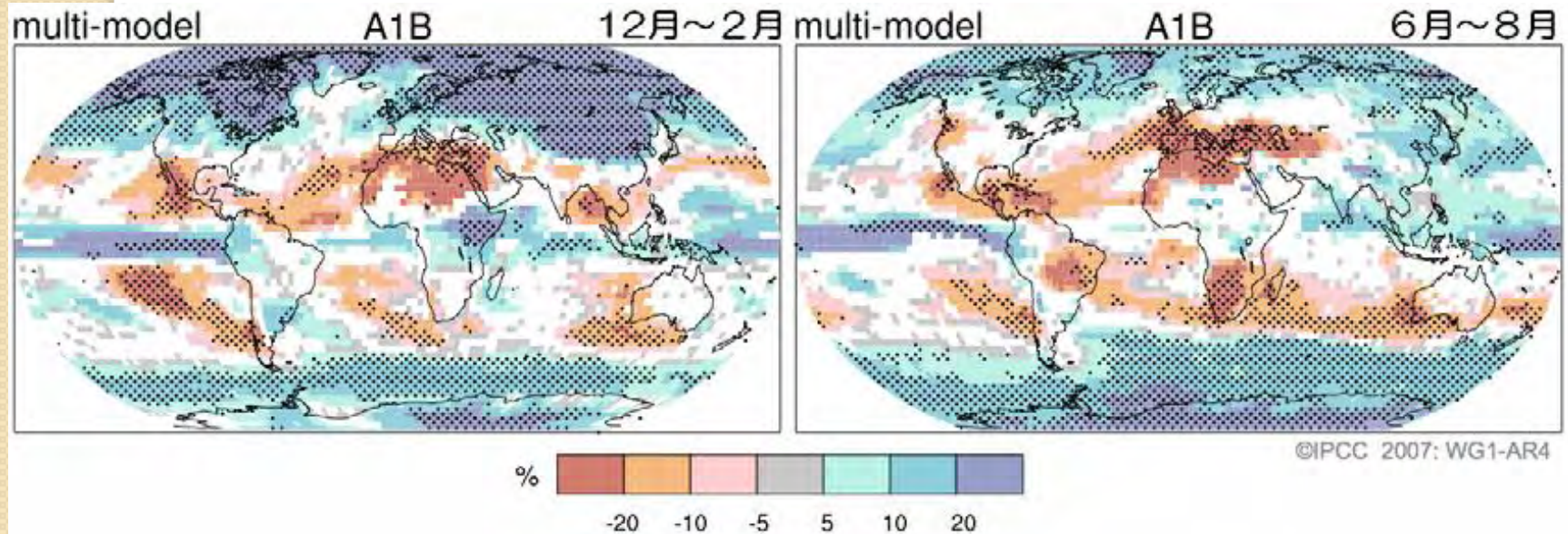
SRES排出シナリオをもとに計算された温度上昇



地表気温変化の地理的分布



季節平均降水量変化の分布





地球シミュレータを用いた 日本での温暖化予測研究

- － 人・自然・地球共生プロジェクト
「日本モデル」ミッション(2002-2006年度)
- － 21世紀気候変動予測革新プログラム
(2007-2011年度)

目的ごとの3種のモデル

1. 長期(300年)にわたる地球環境の変化
温暖化に伴う植生の変化
気候変化(気温、海流、etcの変化)によるCO₂循環の変化
➡ 地球システム統合モデル
2. 近未来(30年)の気候変化予報
エルニーニョ等年々の気候変動
10年スケールでの変化(海面下数100mが影響)
➡ 大気・海洋結合気候モデル
3. 近未来(30年後)や21世紀末における
極端現象(台風、集中豪雨etc)の変化の予測
近未来、21世紀末における海面温度、CO₂濃度の下で数値予報を行う
➡ 数値予報モデル

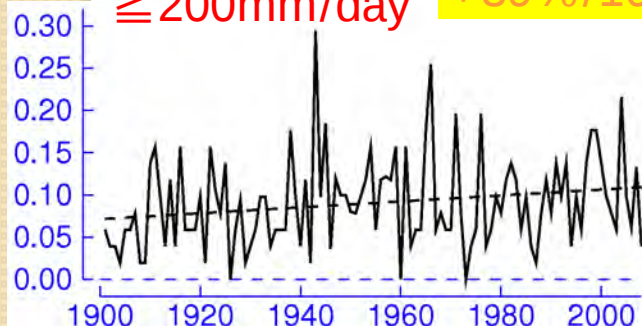
今回の講演ではこの部分のみ紹介

降水強度クラス別に見た出現頻度の変化（100年間）

51地点平均

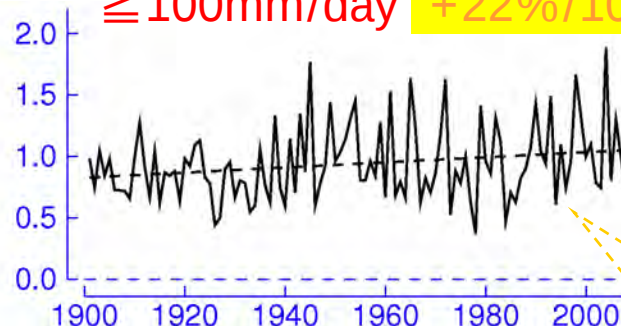
$\geq 200\text{mm/day}$

+39%/100yr



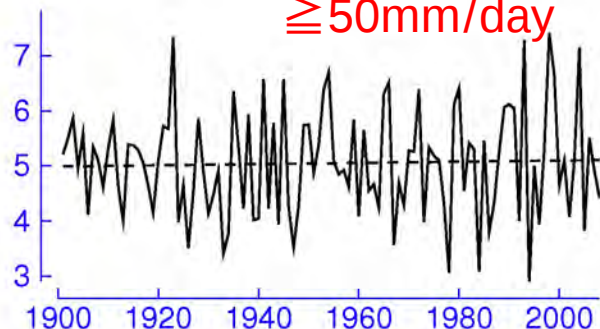
$\geq 100\text{mm/day}$

+22%/100yr

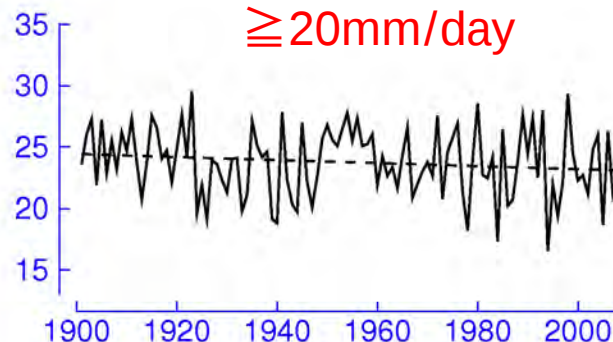


強い雨
増加

$\geq 50\text{mm/day}$

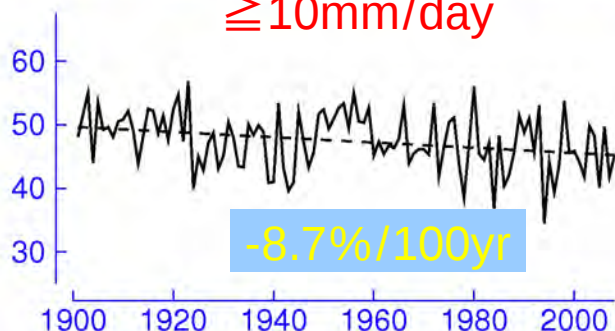


$\geq 20\text{mm/day}$

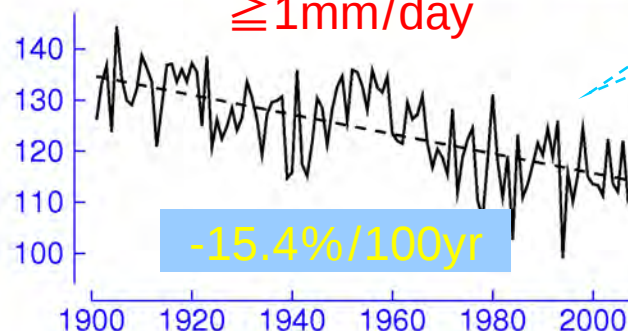


弱い雨
減少

$\geq 10\text{mm/day}$



$\geq 1\text{mm/day}$



-8.7%/100yr

-15.4%/100yr

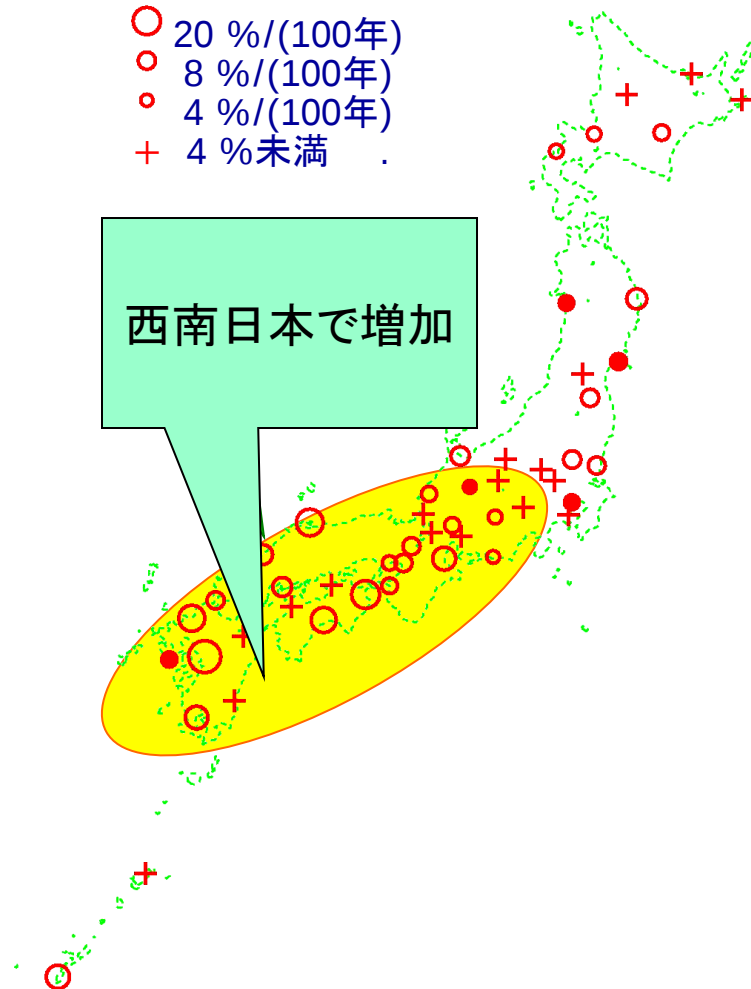
(Fujibe, 2008, JDR)

日本各地での強雨日数、乾燥日数の変化傾向

強雨日(100mm/日以上)

- 20 %/(100年)
- 8 %/(100年)
- 4 %/(100年)
- + 4 %未満

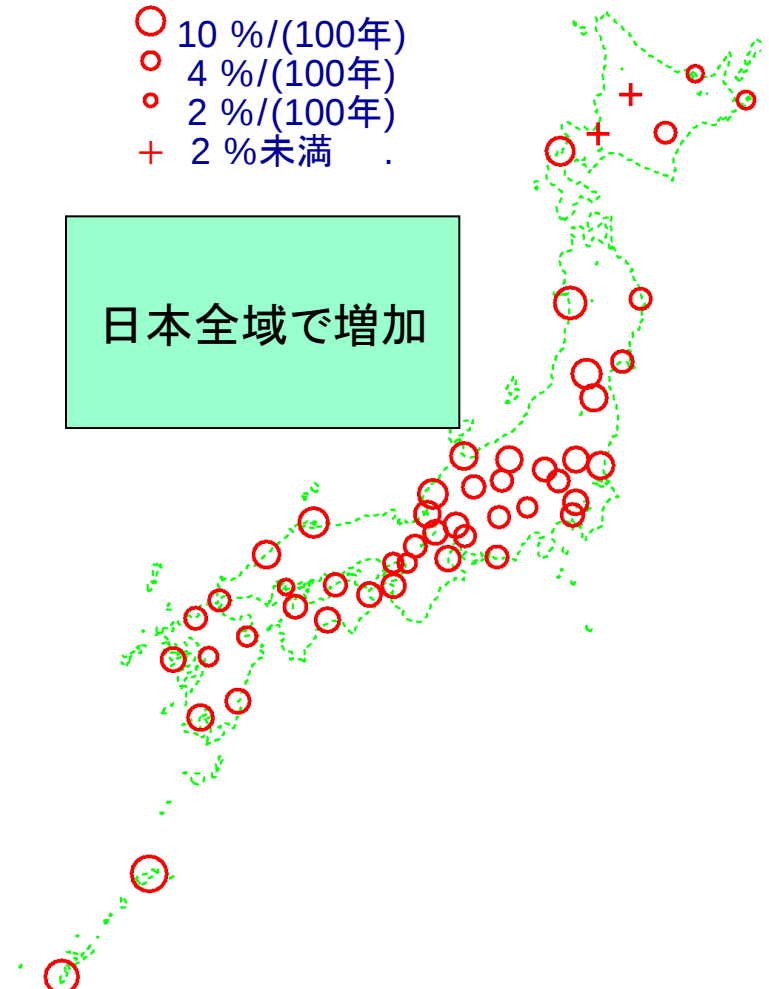
西南日本で増加



乾燥日(1mm/日以下)

- 10 %/(100年)
- 4 %/(100年)
- 2 %/(100年)
- + 2 %未満

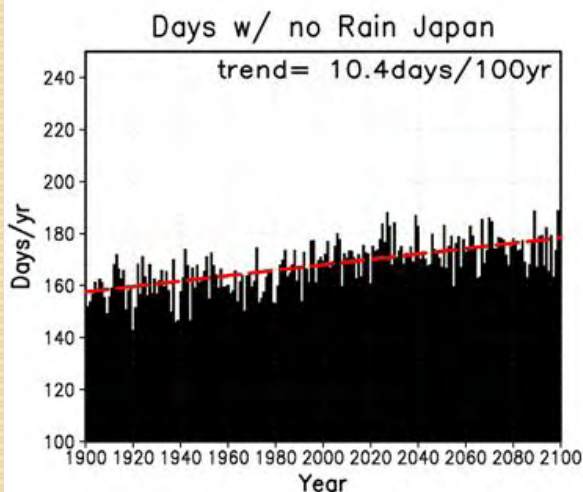
日本全域で増加



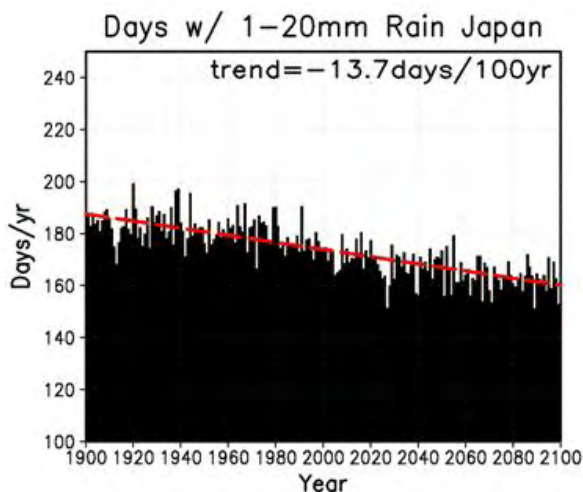
(Fujibe, 2006, JMSJ)

気候モデルで計算された日本周辺の無降水日、 弱雨日、強雨日の日数の変化(1900-2100年)

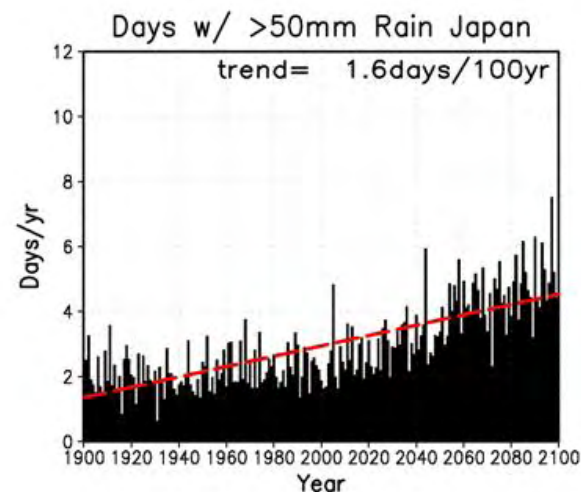
無降水日数
(1mm/日以下)



弱雨日数
(1-2mm/日)



強雨日数
(50mm/日以上)



強雨日、無降水日がともに増え、中間が減る

〔 100kmメッシュの結果で傾向はわかる。しかし定量的には不十分〕
(50mm/日は強雨ではない)

革新プログラムの特色

ヨーロッパ中心でなくアジア、熱帯での気象変化を重視

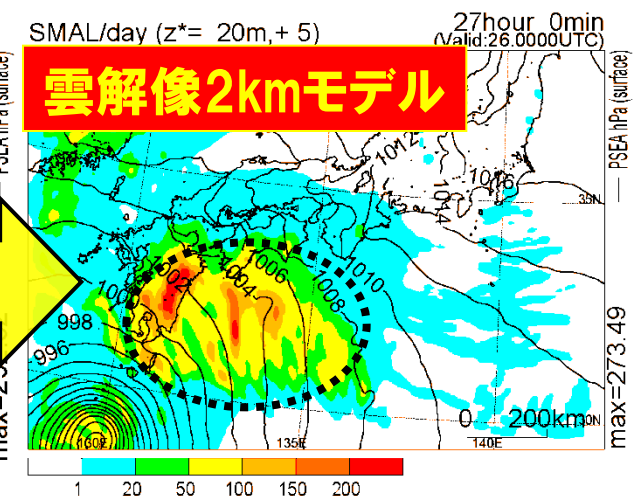
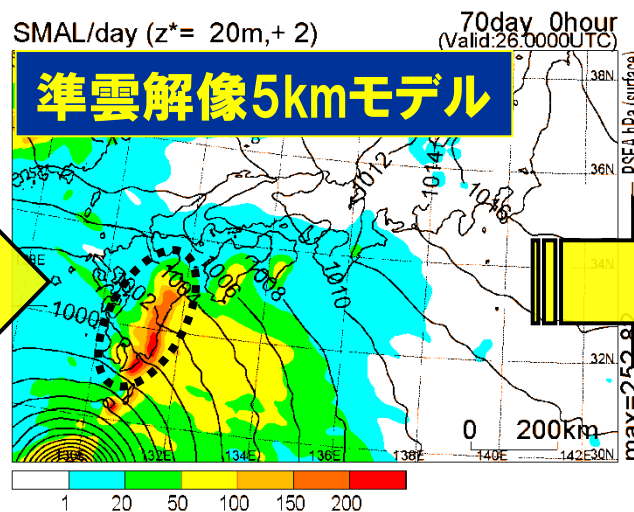
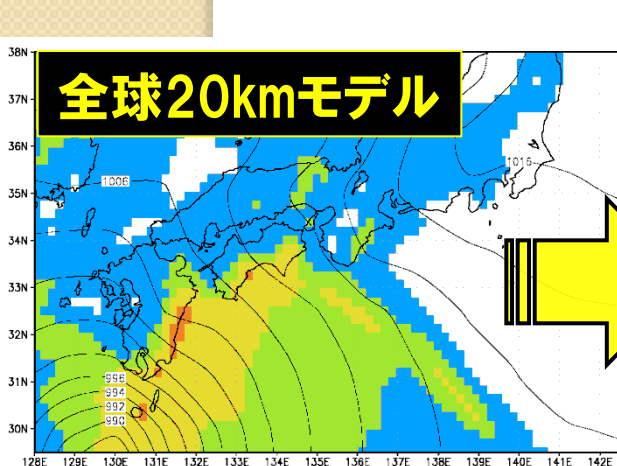
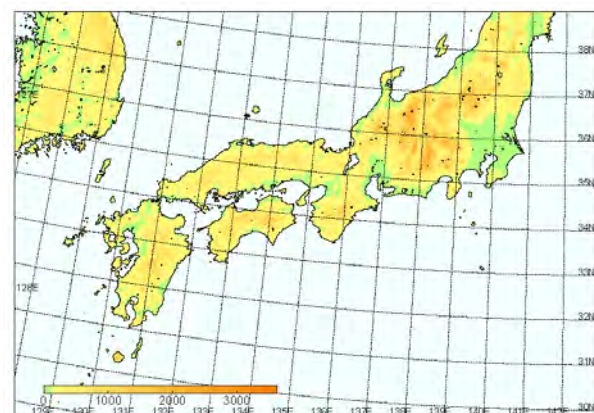
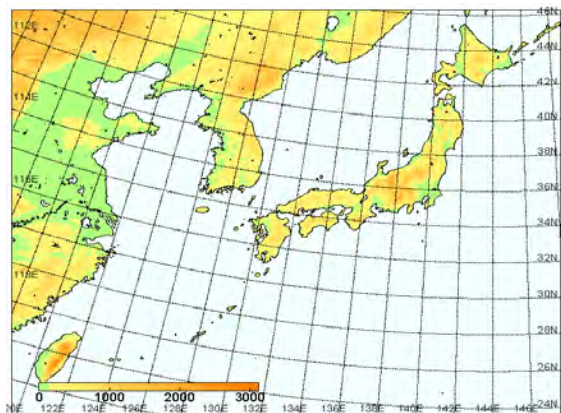
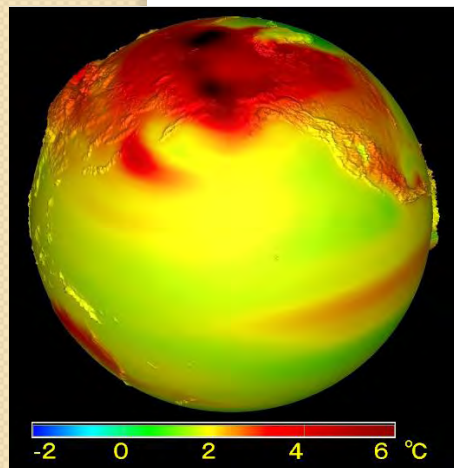
熱帯域や日本(東アジア)の夏の対流性降雨を
高解像度モデルで直接計算 → 第一原理に近い

極端現象チーム	日本周辺	5km	}	夏季5カ月
	西南日本	2km		25年分(予定)
NICAMチーム	全球	7km		(詳細未定)
CRaSSチーム	台風進路	2km		約30例

対流性降雨(熱帯気象)の変化の信頼度高い予測
世界で唯一

革新プログラム・極端現象変化予測

部分的に2段階に高解像度化



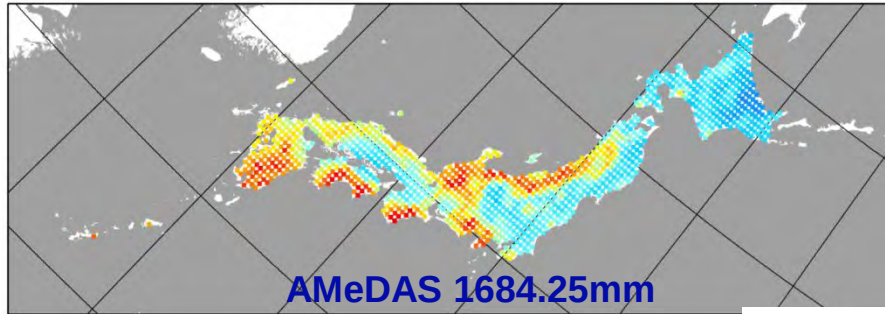
より強い降水の表現

より精緻で現実に
即した現象の表現

雨量分布の比較

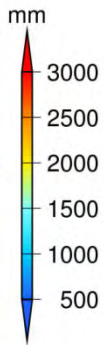
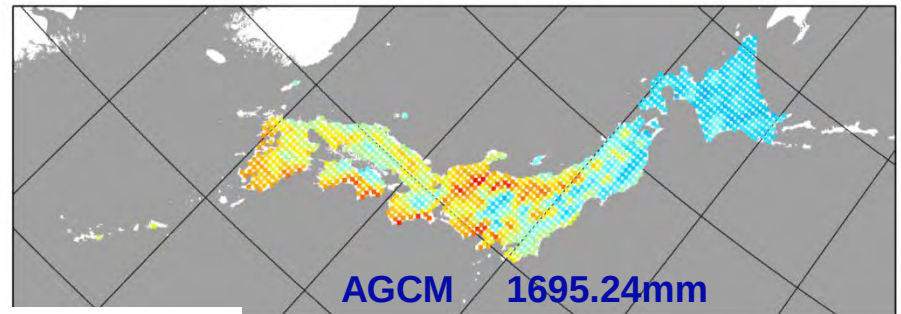
アメダス観測
年平均

Annual Mean Precipitation by AMeDAS



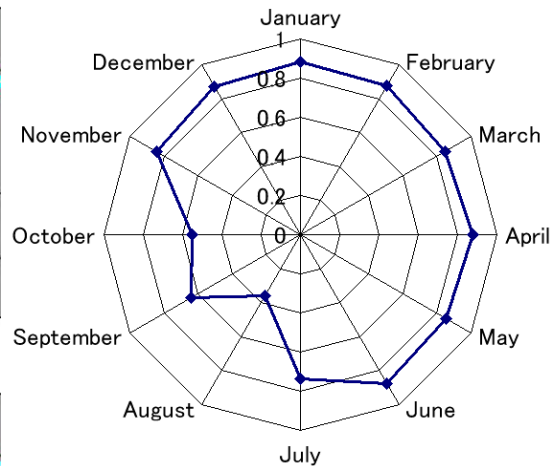
20kmメッシュモデル
年平均

Annual Precipitation by AGCM20

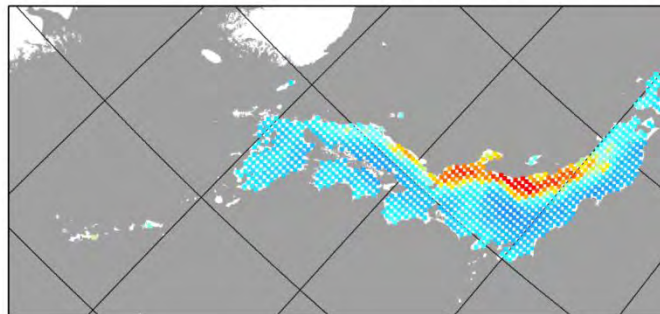


月降水量の分布の相関

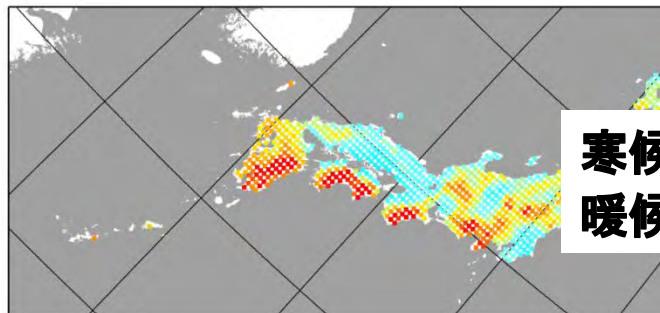
Spatial Pattern Correlation of
Monthly Precipitation



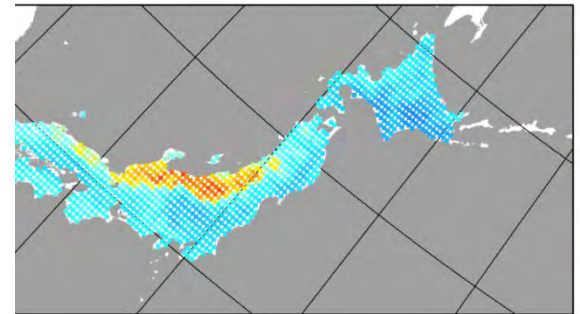
1月



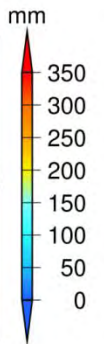
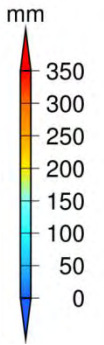
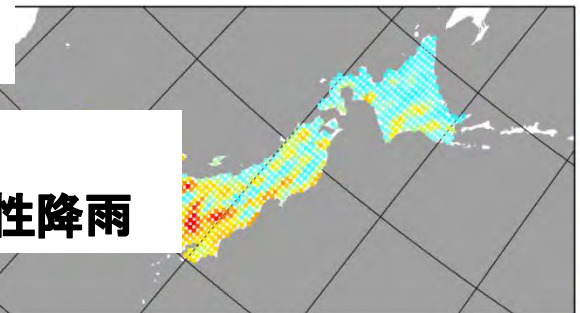
8月



1月



8月



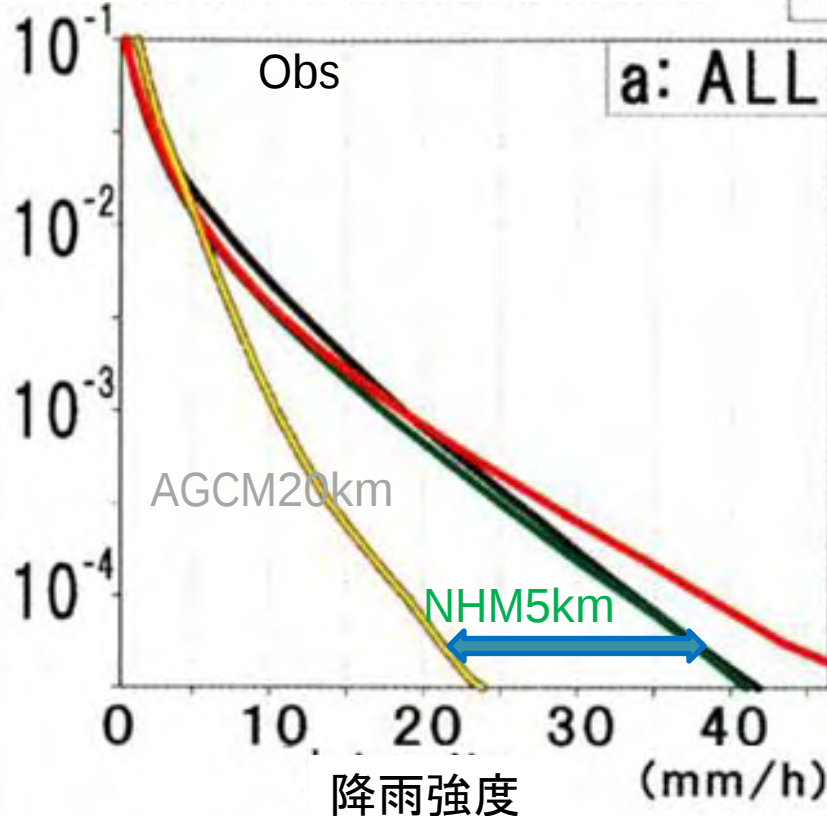
寒候期は観測と合う
暖候期は相関低い → 対流性降雨

20kmメッシュと5kmメッシュ（対流雲直接計算）の比較

雨量強度別出現頻度

(Wakazuki et al., 2007)

降雨強度別頻度(m/h^{-1})

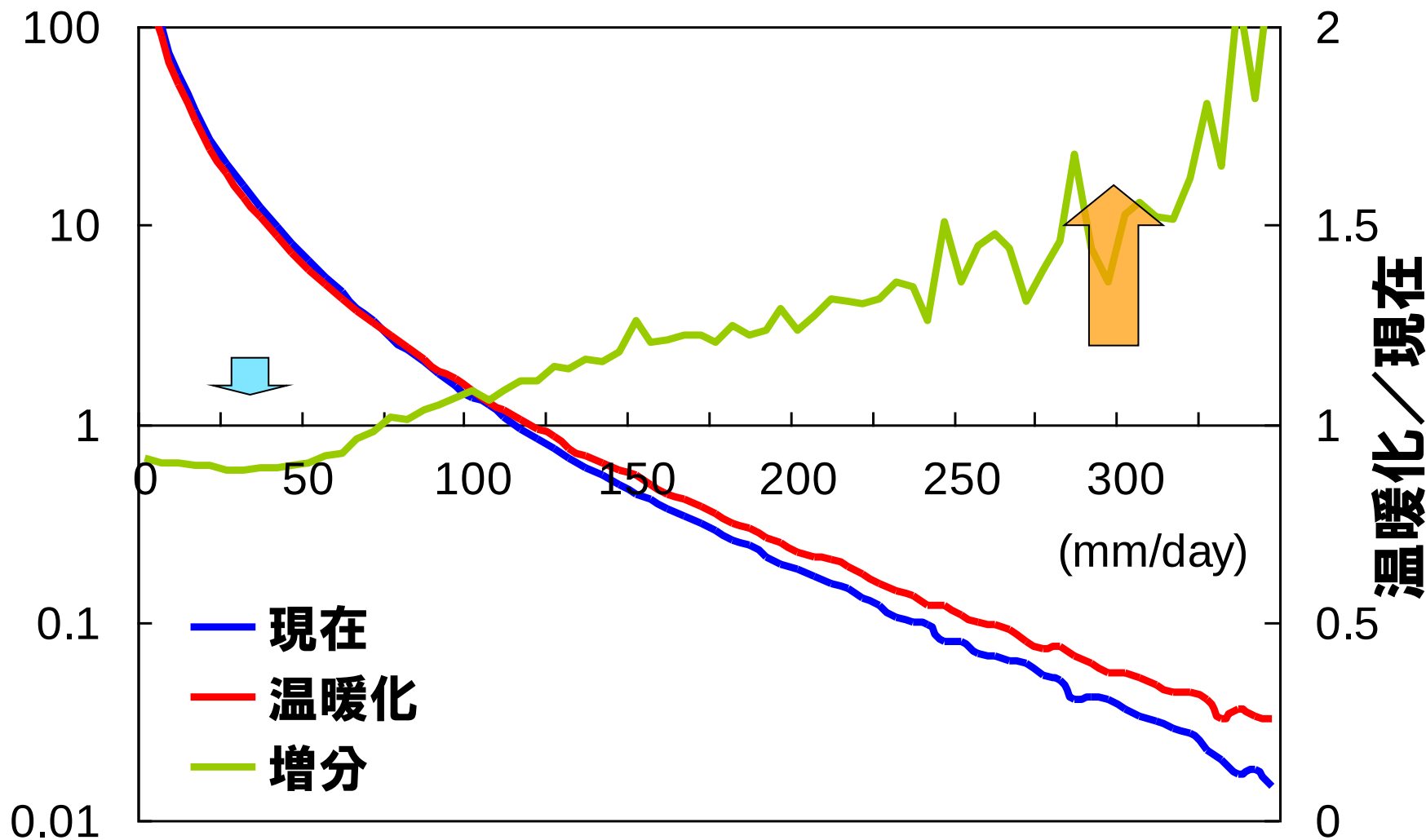


20km-GCM (Present Climate)
5km-NHM (Present Climate)
5km-NHM (Future Climate)
R-A: Obs

20kmメッシュでは集中した強い雨を捕えられない。
5kmメッシュなら実際に近い。

温暖化実験で得られた日本陸上の降水の変化

日降水量の頻度分布の変化



弱い雨の頻度は減少

強い雨の頻度は増加

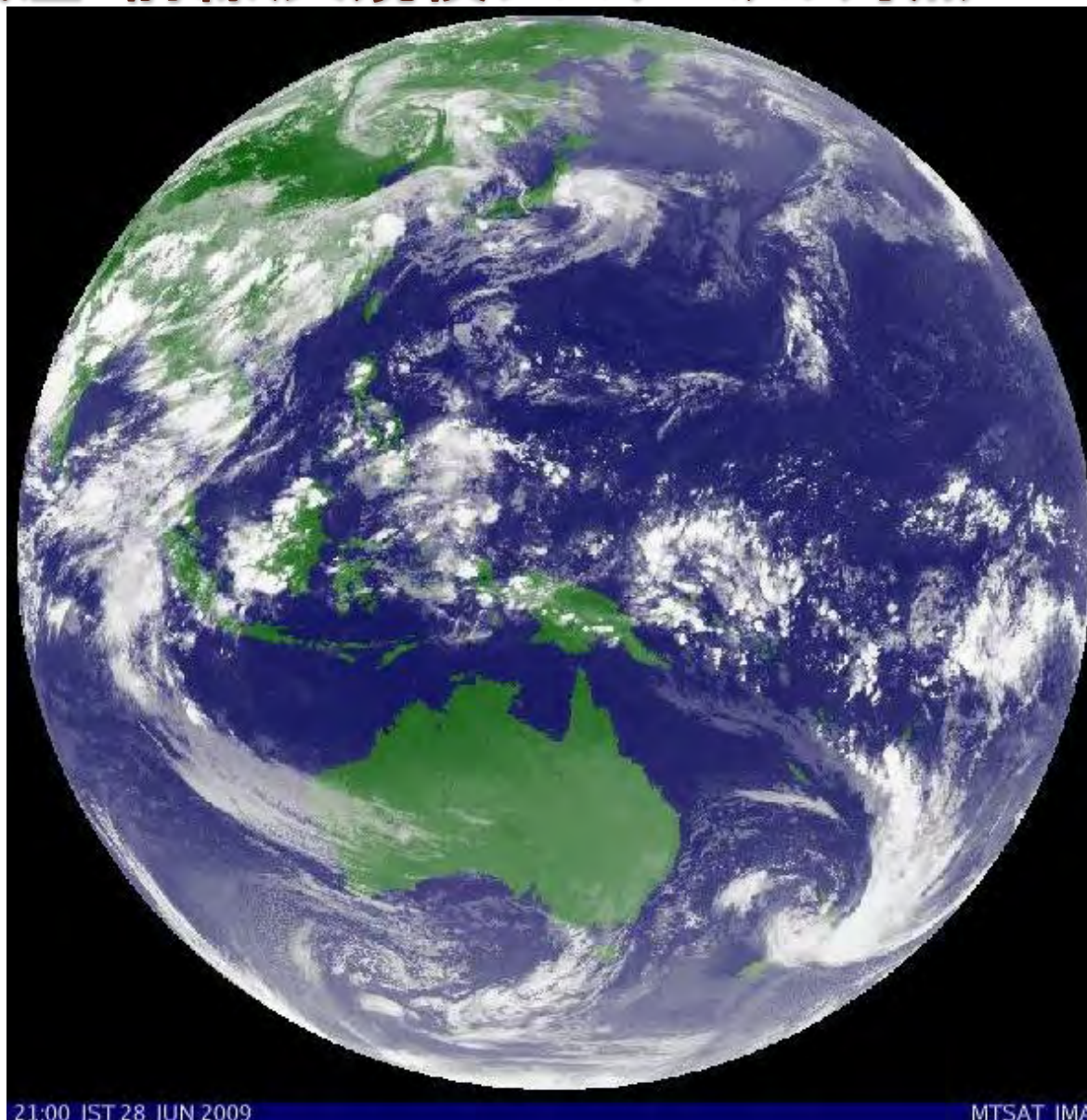


世界初の全球雲(システム)解像モデル

**Non-hydrostatic ICosahedral Atmosphere
Model (NICAM)**

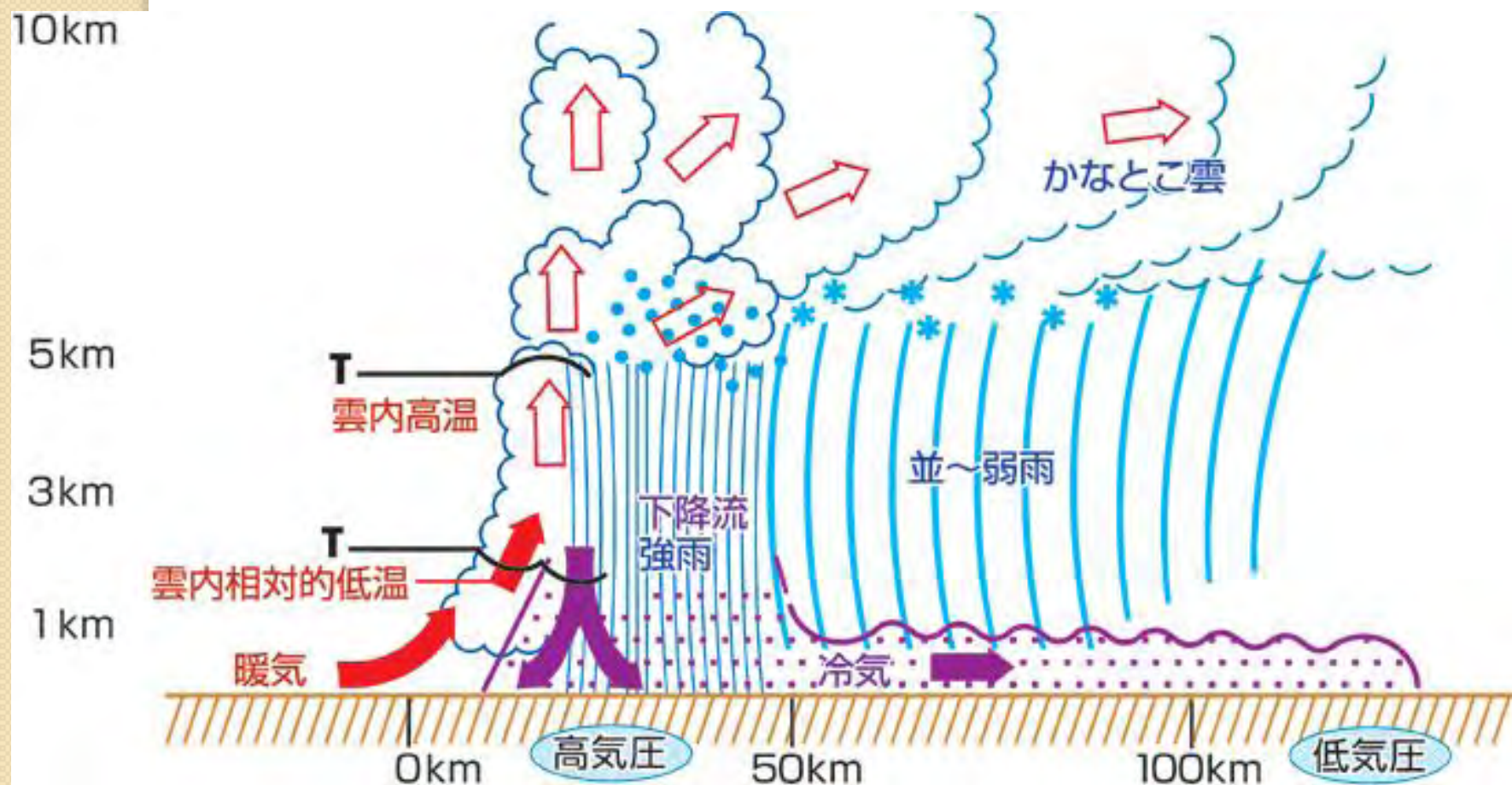
衛星(MTSAT)画像で見る熱帯の対流と(南半球)中緯度の温帯低気圧・前線(大規模システム)の対照

21:00 JST
28 JUNE 2009



熱帯域のクラウドクラスターの構造

温帯低気圧・前線等と同様にモデルで直接計算



マッデン・ジュリアン振動 (Madden Julian Oscillation, MJO)

熱帯域で40～50日周期で気圧が変動

赤道沿いに西から東に動く数1,000kmスケールの低気圧（偏東風に逆らって動く）

- 数1,000kmスケールの対流活発域を伴う
- 地表では強い西風が吹く（西風バースト）
- しばしば台風を生む

中・高緯度の気象にも影響

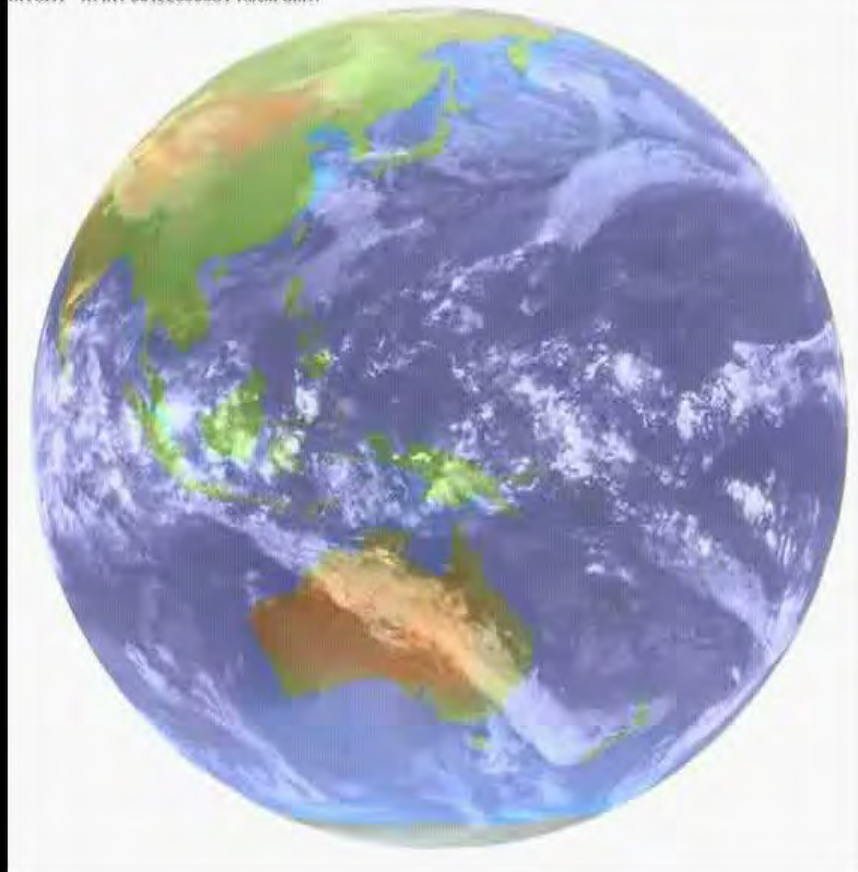
MJOの予報実験

2006年12月15日－2007年1月15日

Geo-stationary satellite
(MTSAT-1R) Infrared image

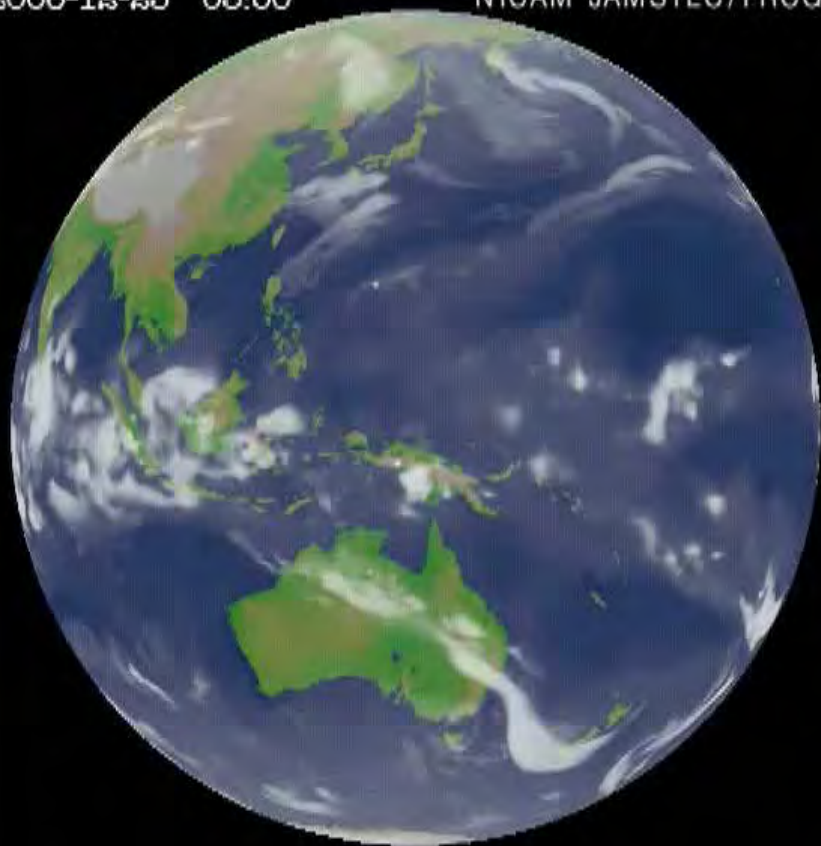
NICAM 3.5km-grid mesh
Simulation
Outgoing Longwave Radiation
(OLR)

MTSAT-1R IR1 06122503JST Kochi Univ.



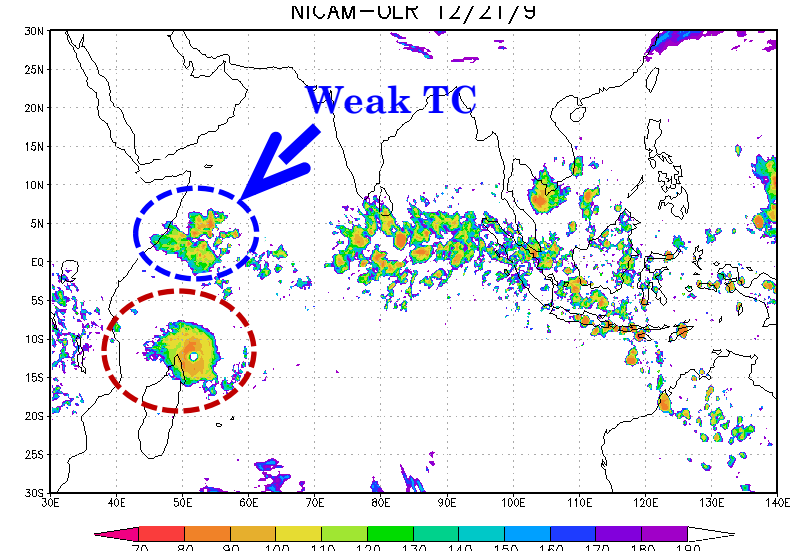
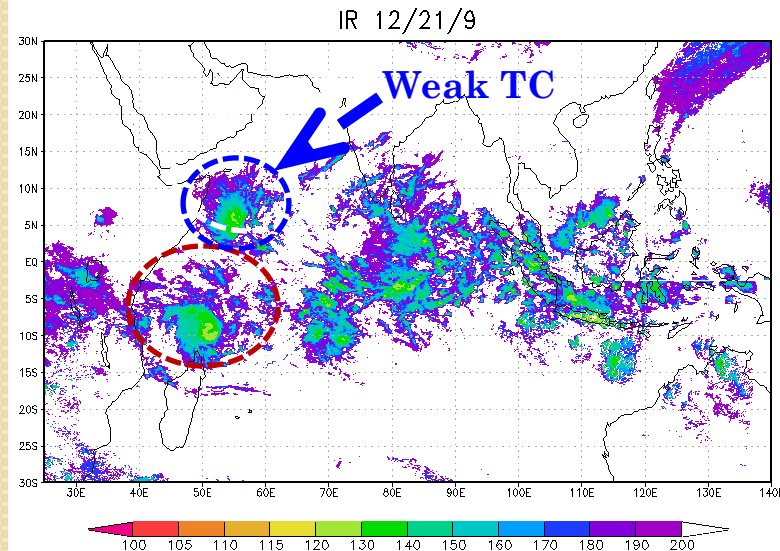
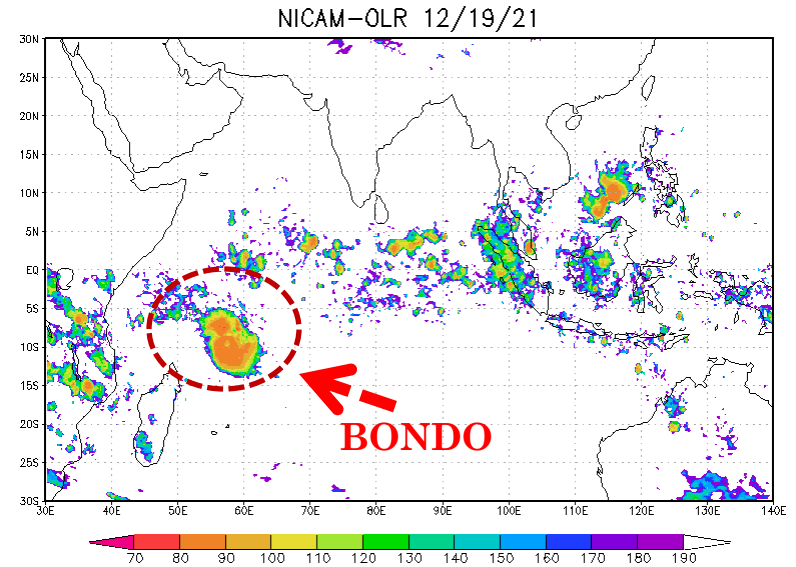
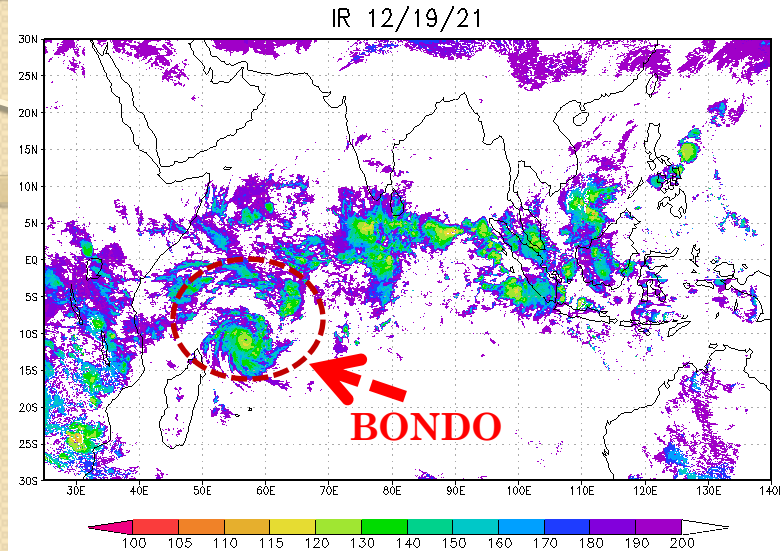
2006-12-25 03:00

NICAM JAMSTEC/FRCGC



西風バーストによる双子熱帯低気圧生成

A pair of cyclones on opposite sides of equator over western Indian Ocean.



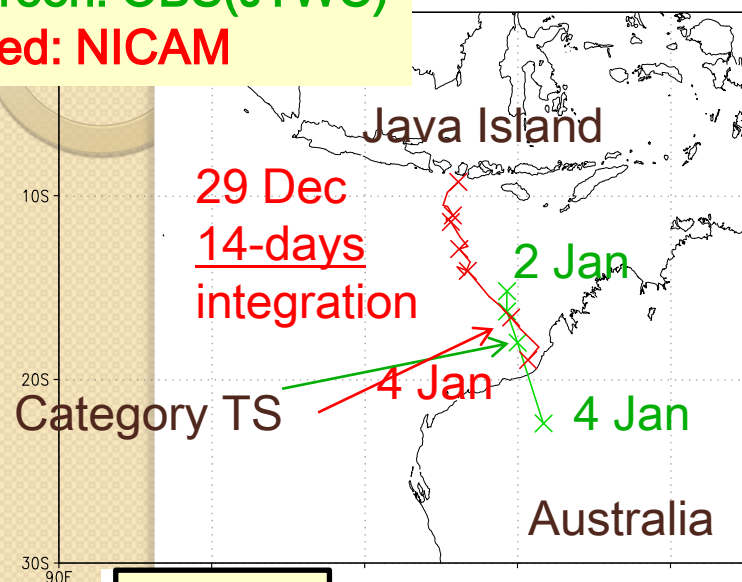
Satellite IR TBB (K)

NICAM OLR (W/m2)

熱帯低気圧Isobelの発生(初期時刻より14日後) 観測(左)とNICAMによるシミュレーション(右)の比較

Green: OBS(JTWC)

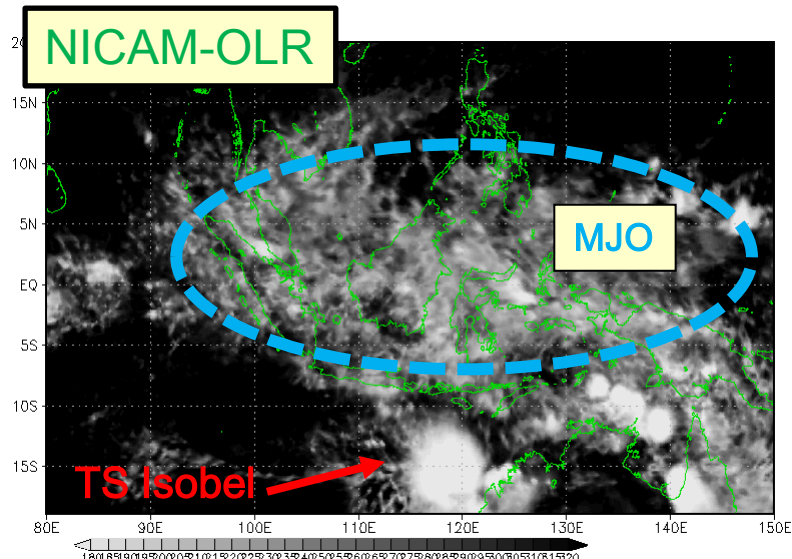
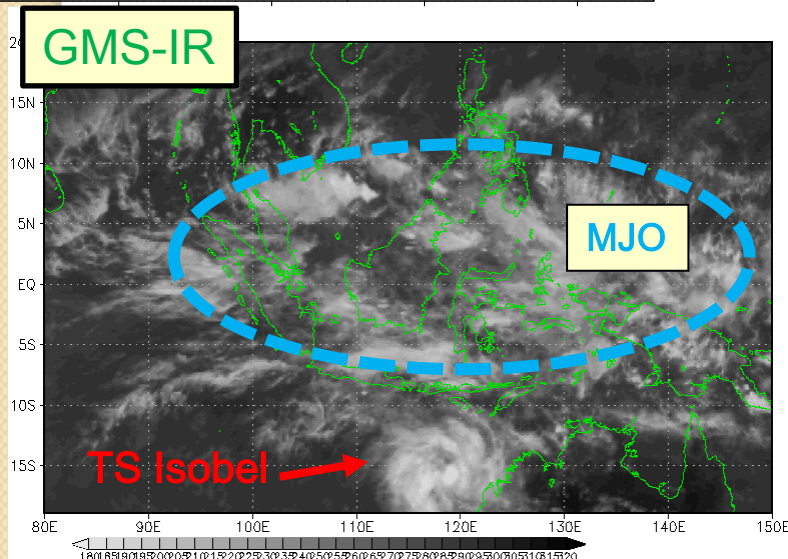
Red: NICAM



NICAM simulated the overall lifecycle of Isobel more than two weeks in advance.

Large-scale environment condition around the Maritime Continent was characterized by the onset of MJO (Miura et al. 2007).

MJO provided the conditions favorable for the genesis of Isobel.



Ⅲ. CO2排出削減と安定化について

-科学・工学の協力による総合的対応を

- 「安定化」の概念の再検討
- ゼロ・エミッション安定化の提案
- 長期的観点に立つ総合的取り組みの必要性

気候変動枠組条約

第二条 目的

この条約及び締約国会議が採択する法的文書には、この条約の関連規定に従い、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ことを究極的な目的とする。そのような水準は、生態系が気候変動に 自然に適応し、食糧の生産が脅かされず、かつ、経済開発が持続可能な態様で進行することができるような期間内に達成されるべきである。

Article 2

OBJECTIVE

The ultimate objective of this Convention and any related legal instruments that the Conference of the Parties may adopt is to achieve, in accordance with the relevant provisions of

the Convention, stabilization of greenhouse gas concentrations in the atmosphere at a level that

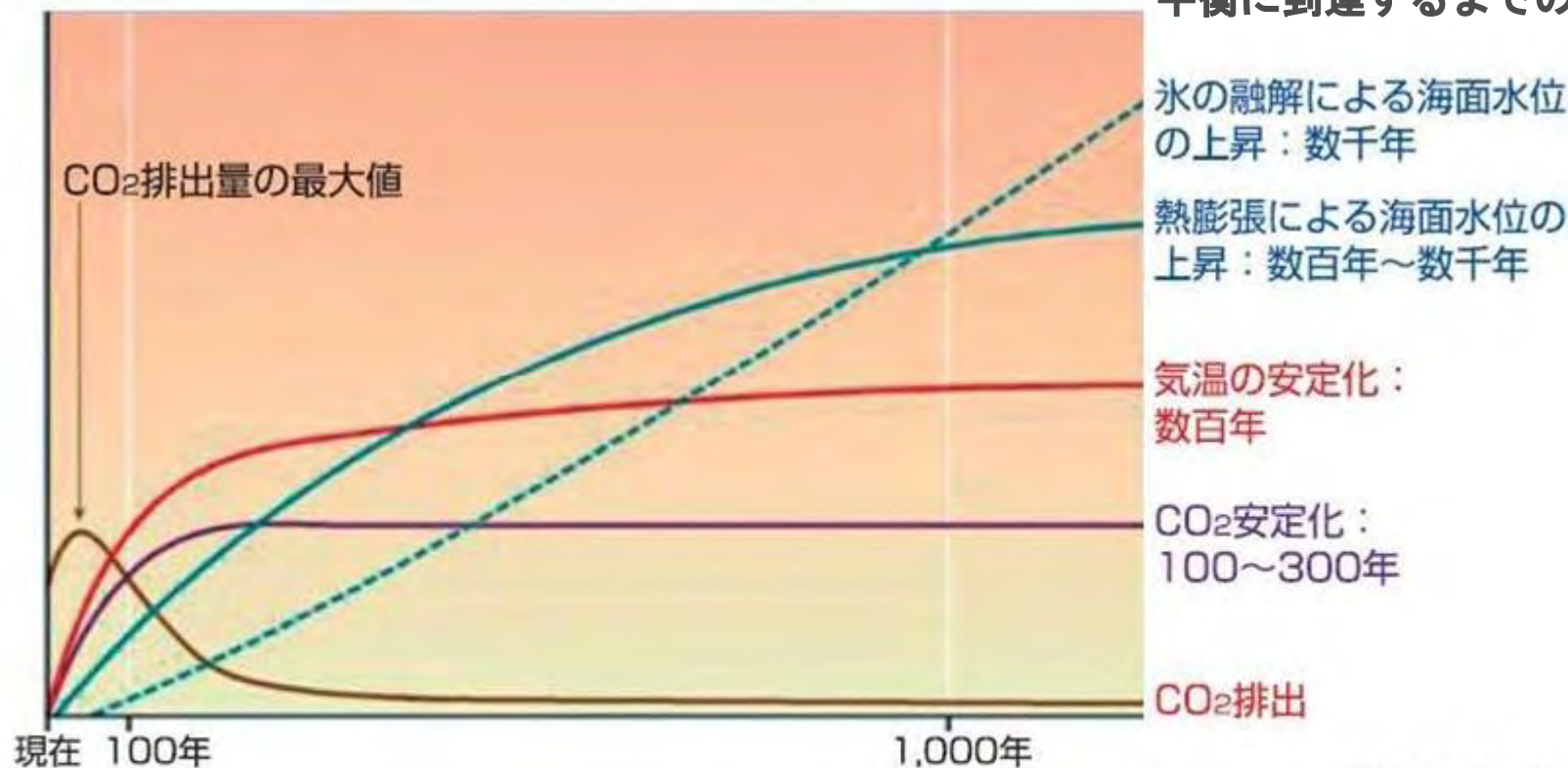
would prevent dangerous anthropogenic interference with the climate system. Such a level should be achieved within a time frame sufficient to allow ecosystems to adapt naturally to climate change, to ensure that food production is not threatened and to enable economic development to proceed in a sustainable manner.

通常の「安定化」概念

IPCC TAR 統合報告書

安定化後長期にわたる海水位上昇

平衡に到達するまでの時間

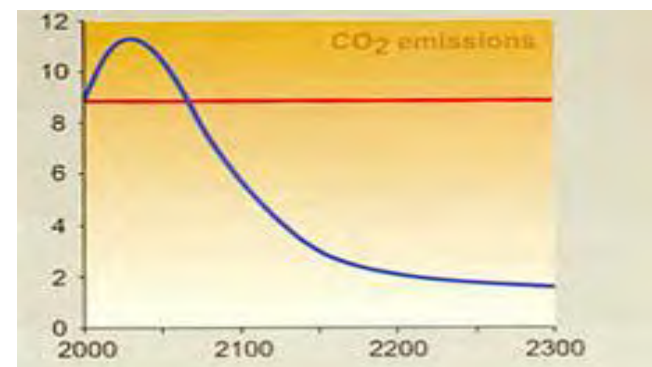


(IPCC TAR)

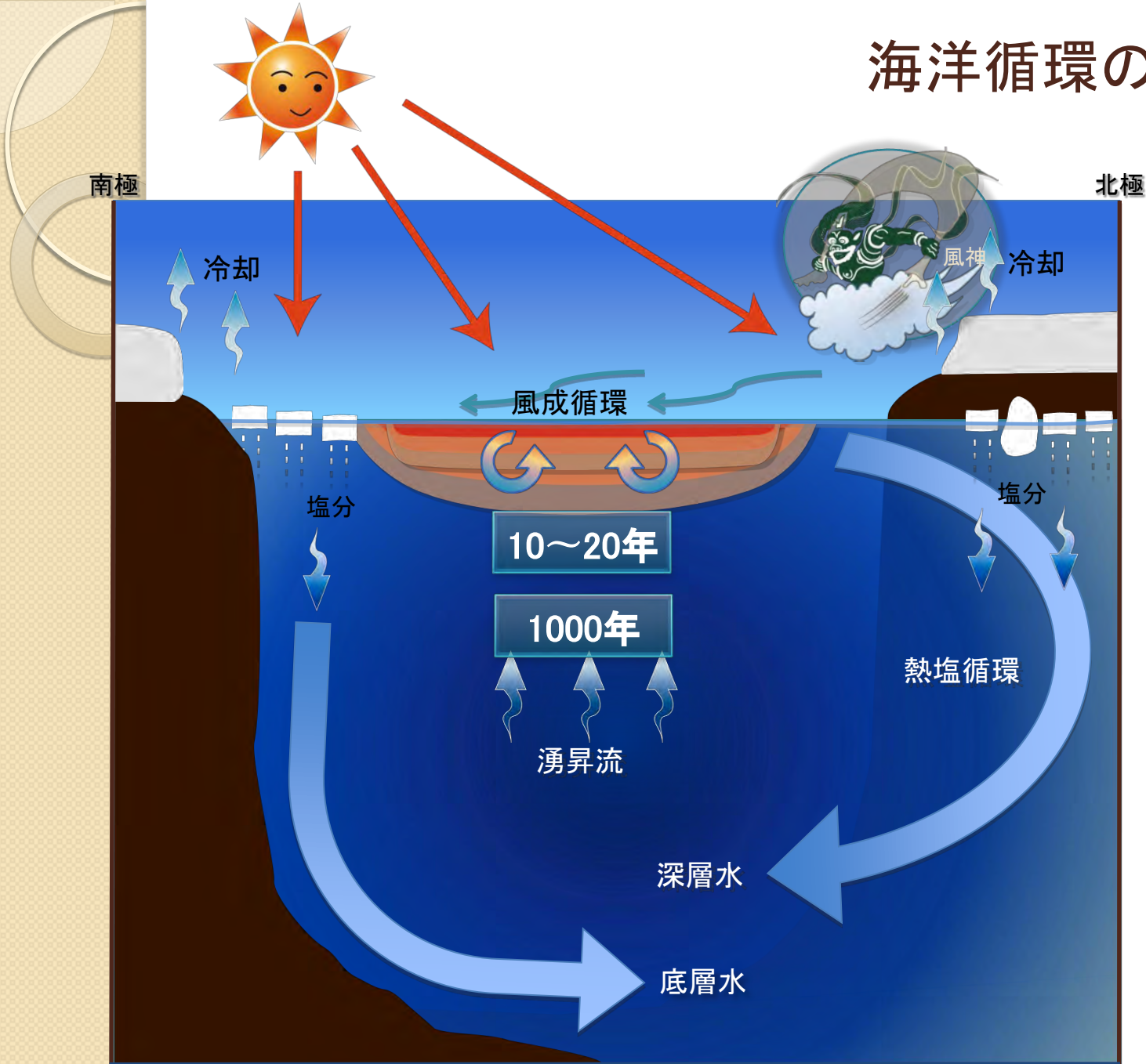
図9 200年後に大気中CO₂濃度を安定化させた場合に予測される気温と海面水位の変化の模式図 (IPCC TAR)。海面水位上昇、とりわけ氷床融解によるものはCO₂濃度と気温が安定化した後も数千年間続く

従来の安定化の基本的特性

- CO₂ (温室効果ガス) 濃度は、安定化実現後は目標としたレベルで一定値に保たれる。
- これに対応する排出経路は:
 - ① 現状の傾向に沿い当面は増加しピークへ
 - ② ピークを過ぎて減少に転ずる
 - ③ 急激な排出量減少
 - ④ 減少スピードが弱まる
 - ⑤ 少量でほぼ一定の排出が継続
- 温度は目標とする安定化濃度での平衡温度に向け上昇を続ける。しかしその間何世紀もかかる(濃度が安定化目標に達した時点で実現する温度上昇は平衡昇温の65～70%、IPCC AR4)
- 安定化した状態でも(現在より高濃度・高温が一定に保たれたもとで)海水位は海水の熱膨張と氷床融解のため上昇を続ける。

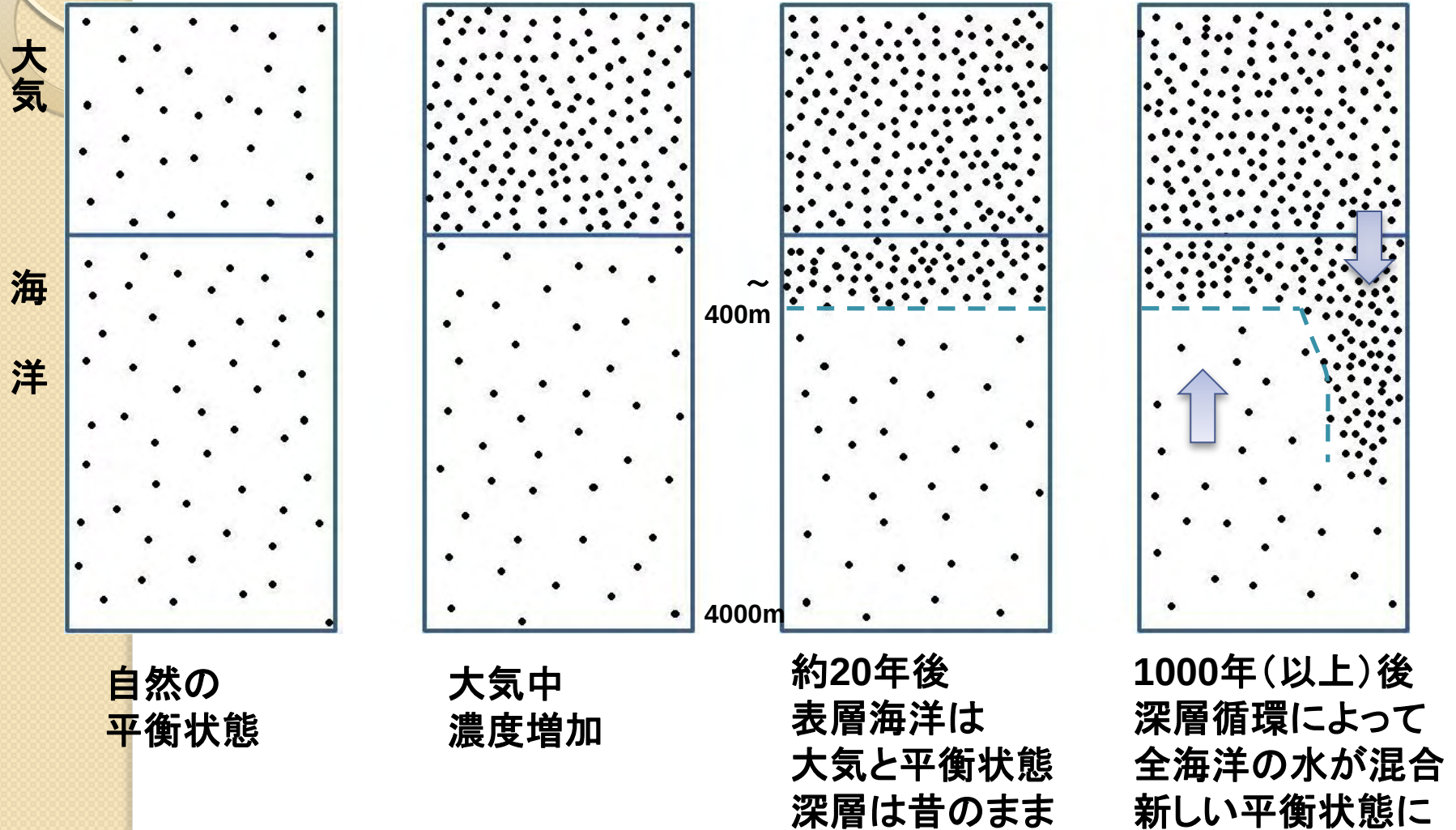


海洋循環のメカニズム



海洋によるCO₂吸収の模式図

(濃度一定の下ではほぼ一定の排出が続く不思議)



従来の「安定化」への素朴な疑問

何故、世界（人類社会）は、劇的な排出削減を達成した後に、排出削減のペースを遅くしてしまうのか？

何故、何の目的のために少量のしかし無視しえない量（ピーク時の10～20%）のCO₂排出を1,000年にもわたり続けるのか？

少量のCO₂排出を続ける必要はもともとないのではないか。

これは、「安定化＝一定濃度を保つ」という前提から逆算して出てきた結果にすぎないのに違いない。すなわち、炭素循環プロセスにおいて、海洋などの自然吸収があるため、それに対してCO₂濃度を「安定化レベル」に一定に保つ（減少させないため）必要とされる排出量である。

➡ 排出継続安定化 (Emissions keeping stabilization)

自然の回復効果に逆らって相対的に高いCO₂濃度と高い温度を一定に保つために人為的CO₂排出を続けるのは奇妙なことだ。

「ゼロ・エミッション安定化」という新しい安定化概念

(現在議論されているように)「安定化」を目指して大きな削減努力するのであれば、それを緩めることなく継続し、目標とする安定化濃度での自然吸収量(現排出の10～20%程度)より十分低いレベルまで排出量を減らす → 実質的ゼロ・エミッション

それができればCO₂濃度は減少に転ずる

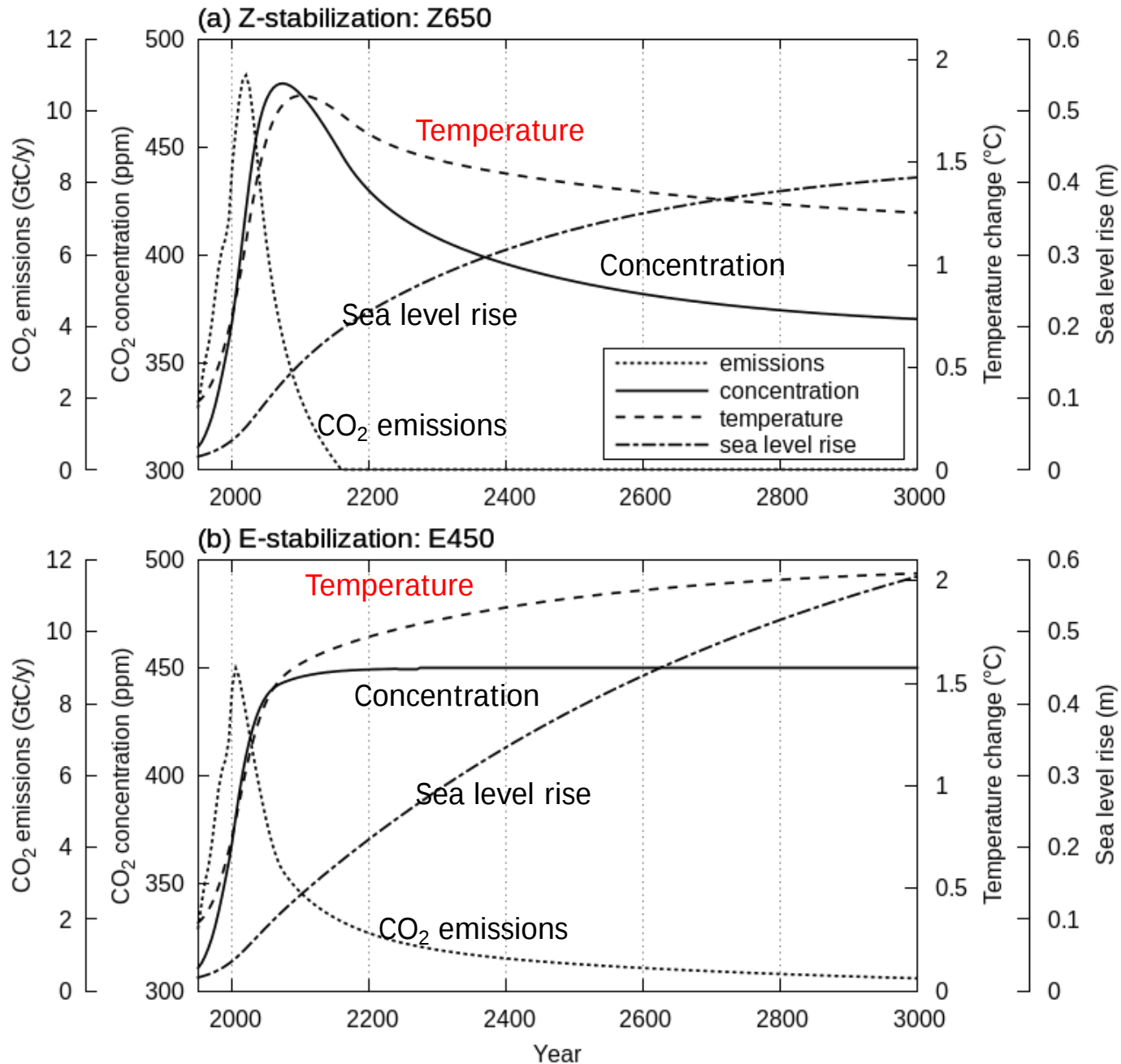
同時に温度上昇も頭打ちとなりゆっくりした下降(1世紀に0.3°Cといったペース)に向かう。「寒冷化」の危険はなかろう

最終的に(約1,000年経た後に)、産業革命以前と同じような「安定な平衡状態」に落ち着く。ただし、CO₂濃度も気温も産業化以前よりは高い値となっている。

2種の安定化の比較（CO₂のみ）

E450	目標濃度レベル450ppmの従来型安定化
Z650	21世紀中CO ₂ 総排出量650GtCの ゼロ・エミッション型安定化

Z650 (a) と E450 (b)の長期にわたる特性





実際問題に適用できる ゼロ・エミッション安定化シナリオの提案

ゼロ・エミッション安定化の特色を生かす

- ・ 同一の温度上昇制約のもとで、従来の安定化に比べて近い将来により多い排出が許容される。
- ・ 昇温のピークは相対的に短い期間で一時的に現れるのみである。(E-安定化はいつまでも続く)。
- ・ 最終的平衡時の昇温はE-安定化の場合より低い

下の2点から導かれること:

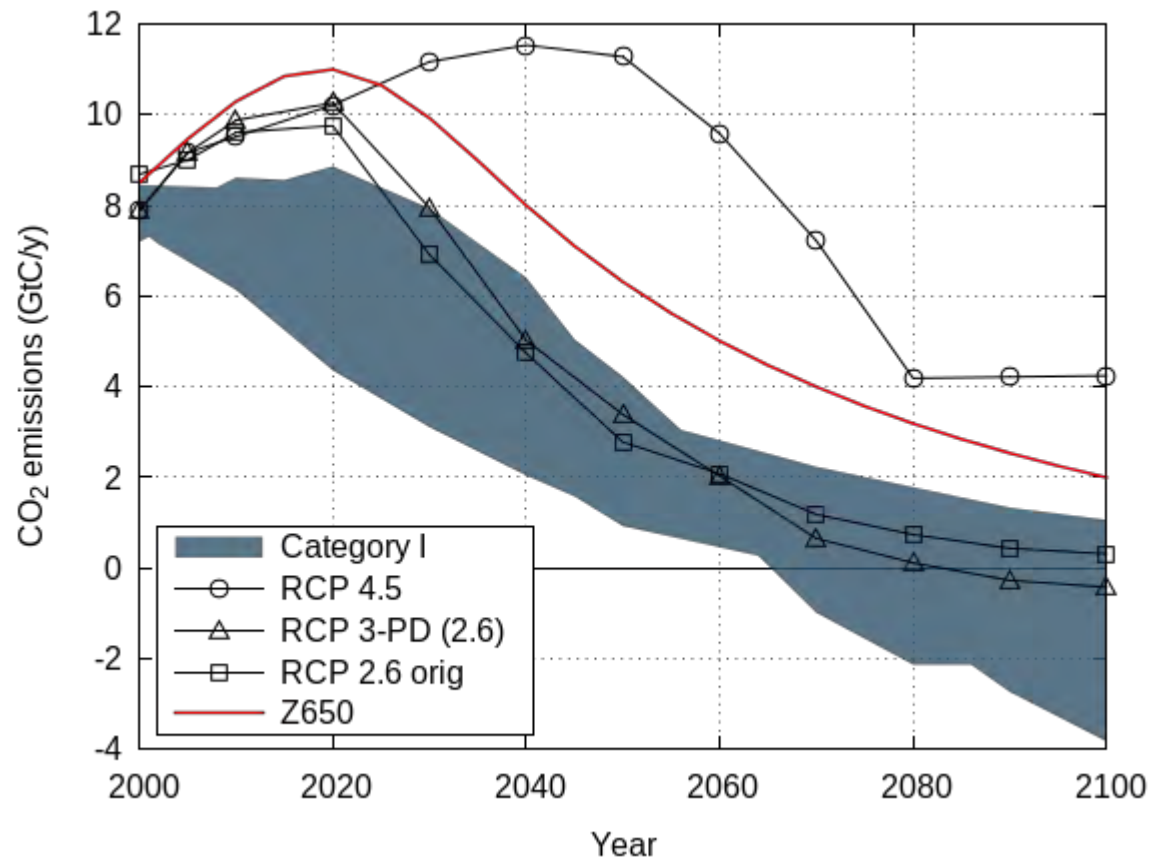
従来の安定化の場合目標濃度での一定の温度上昇がいつまでも続くので(特に氷床融解による)海水位上昇がどんどん大きくなる。

これに対してZ-安定化の場合は限られた期間しか最高温にならないので、温度上昇の限界は少しゆるめても危険はなかろう。

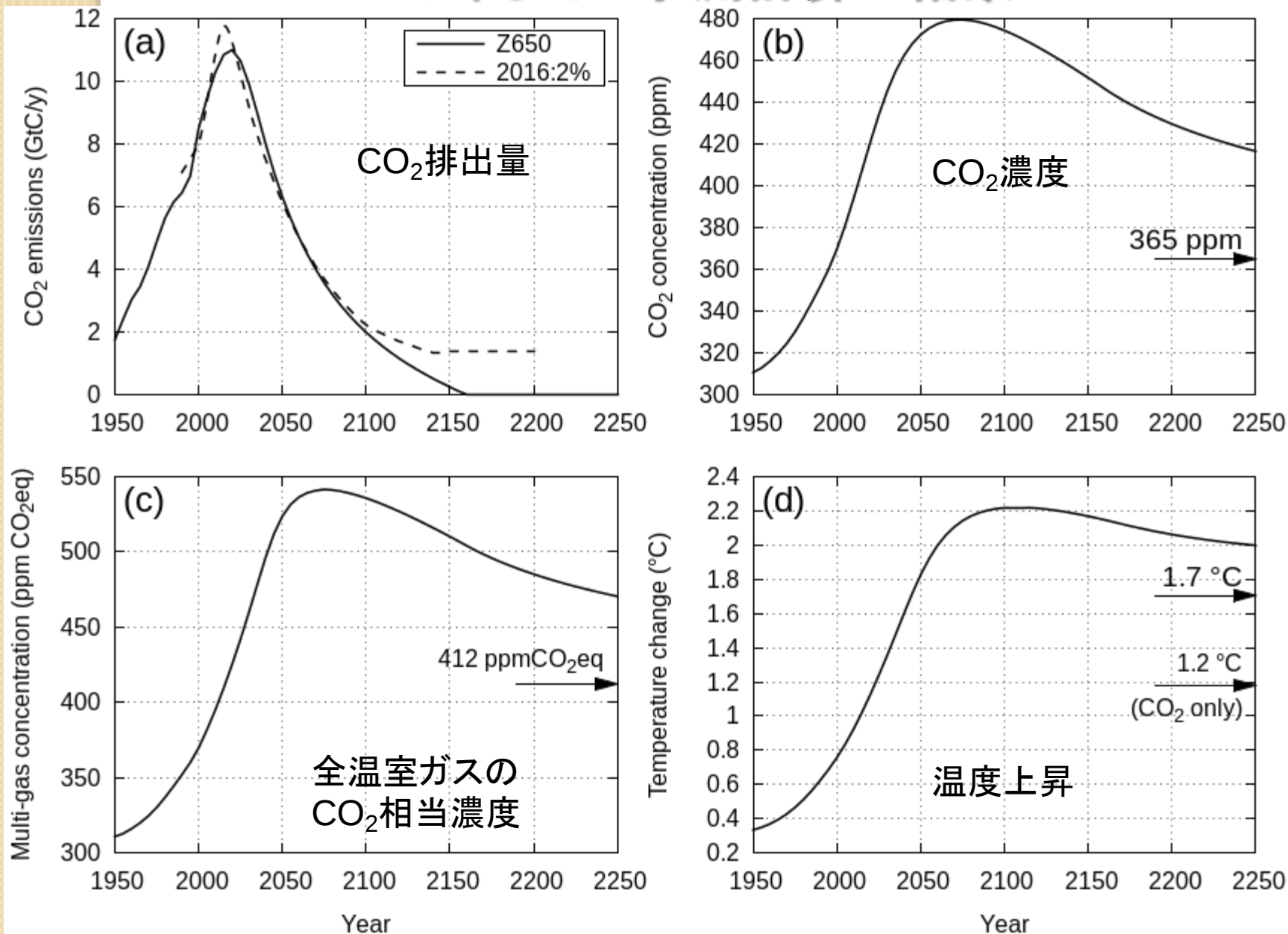
Z650 の場合、CO₂のみの場合の最高昇温は1.8℃であった。

➡ 他の温室効果ガスの効果を加えても2℃を少し超える程度。

RCP 2.6, RCP3-PD, RCP 4.5 及び Z650 シナリオのCO₂排出経路(2000 - 2100年)

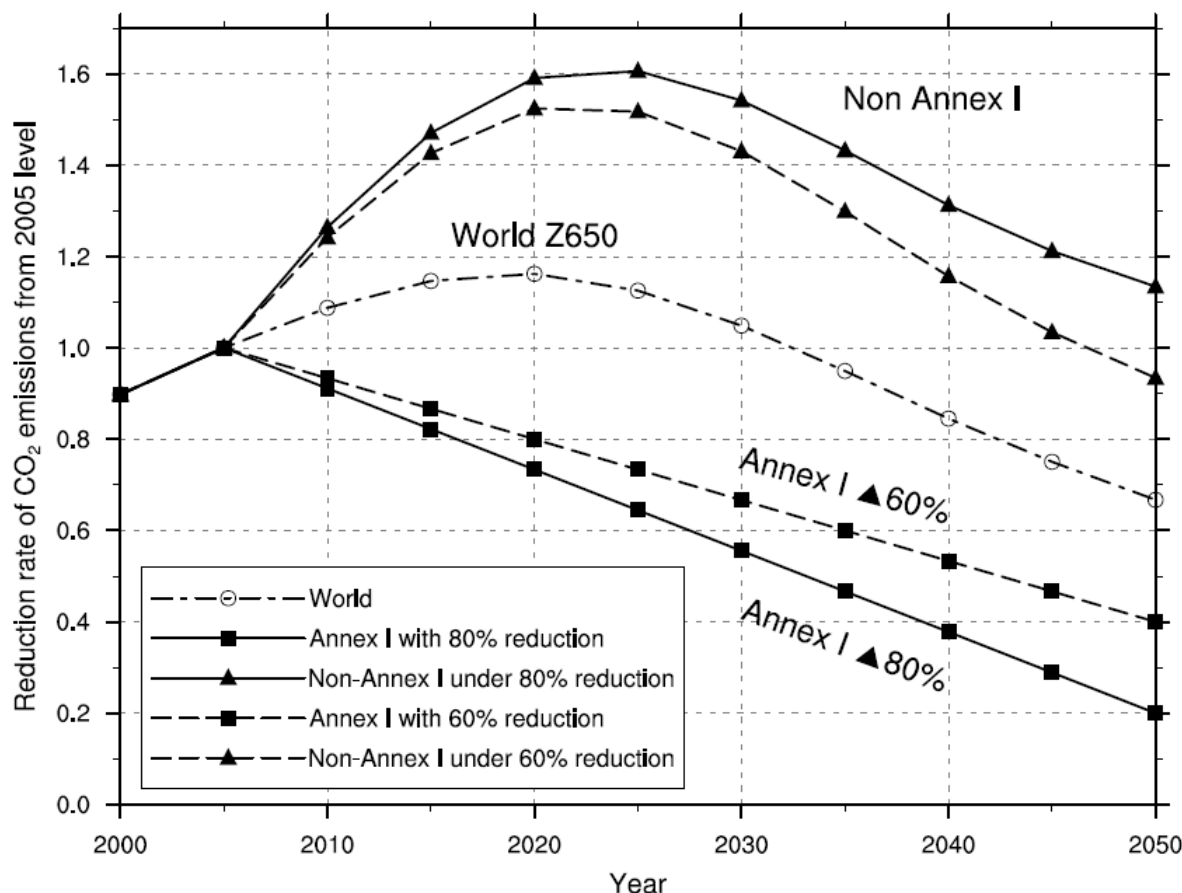


現実的な場合(他の温室効果ガスを含む)Z650 シナリオによる 2250年までの予測計算の結果



Z650シナリオによるCO₂排出の社会・経済的意義

近い将来のより大きな排出量により開発途上国へ多く割り振ることが可能



今後取り組むべき課題

- 長期(数世紀, 数千年) にわたる気候と海水位そして地球環境についての見通し。(温暖化の過度状態と最終的平衡状態)
 - その際考慮すべきは外的原因による気候変化である。すなわち太陽活動の変動、ミランコビッチ・サイクル(地球自転軸と軌道要素の変化)など
- ゼロ・エミッションの実現可能性
 - その際、化石燃料でのみ可能な用途とその量は?
 - CO₂以外の温度効果ガスの濃度逡減策はないか

海面水位上昇の大まかな見積もり

Z650シナリオでは 温度上昇のピーク $\Delta T = 2.3^{\circ}\text{C}$

最終平衡状態では $\Delta T = 1.5^{\circ}\text{C}$

(ただし、 CH_4 、 N_2O は自然レベルに戻す)

➤ グリーンランド氷床融解による海面水位上昇: 斉藤と阿部の研究(2006, 2008)をもとに推算

- 3000年において 0.5m

$\Delta T = \text{一定} = 2^{\circ}\text{C}$ (B1 シナリオ、2000年)

- 最終平衡状態 約1.5m (10,000年後)

$\Delta T = \text{一定} = 1.5^{\circ}\text{C}$ (Z650で CH_4 , N_2O は自然レベルに復帰)

- しかし、5,000年後では約1.0m (最終状態の70%)

➤ 海水の熱膨張

- 3000年において 0.5m (SEEPLUSより)

- 最終平衡状態 $> 0.4\text{m}$ (1.5°C)

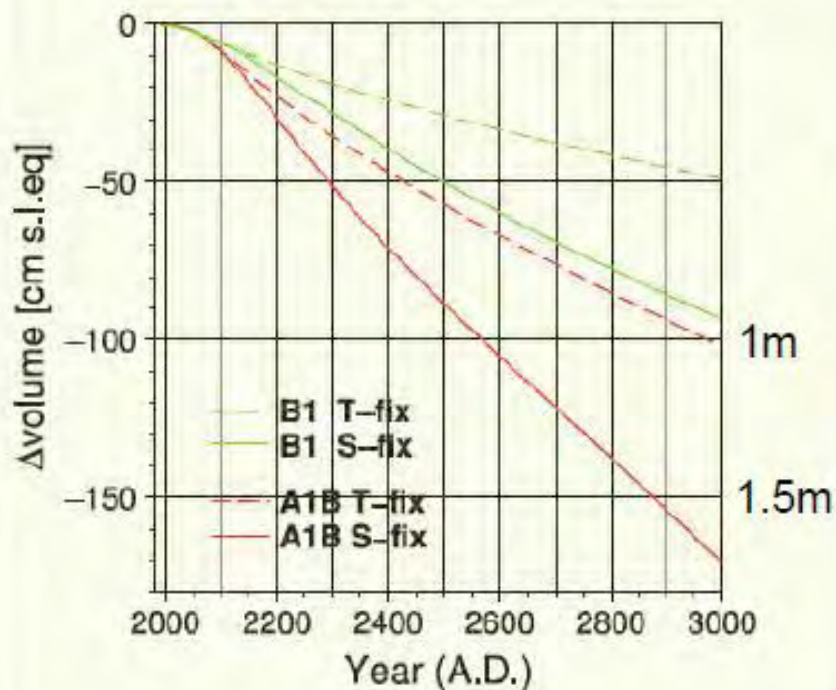
➤ 合計 (ただし、南極氷床、山岳小氷河の寄与を除く)

3,000年において約1.0m, 7,000年(5,000年後)約1.5m

1000年後のグリーンランド氷床予見

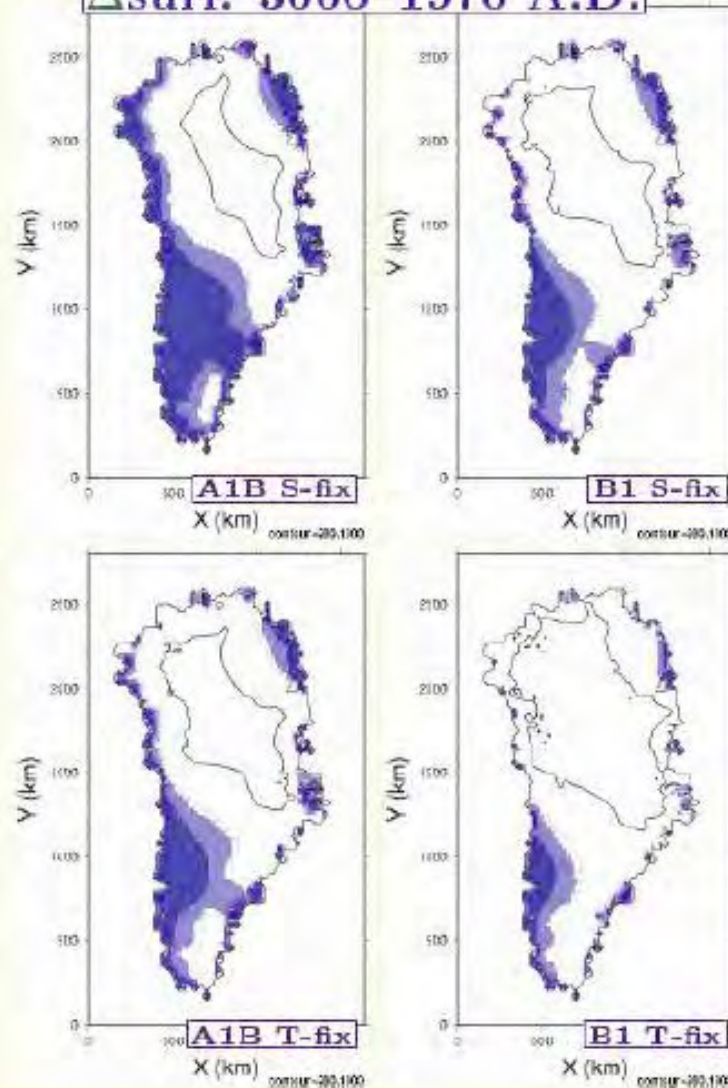
(流動を含む)

海水位熱膨張分は 0.5~0.8 m



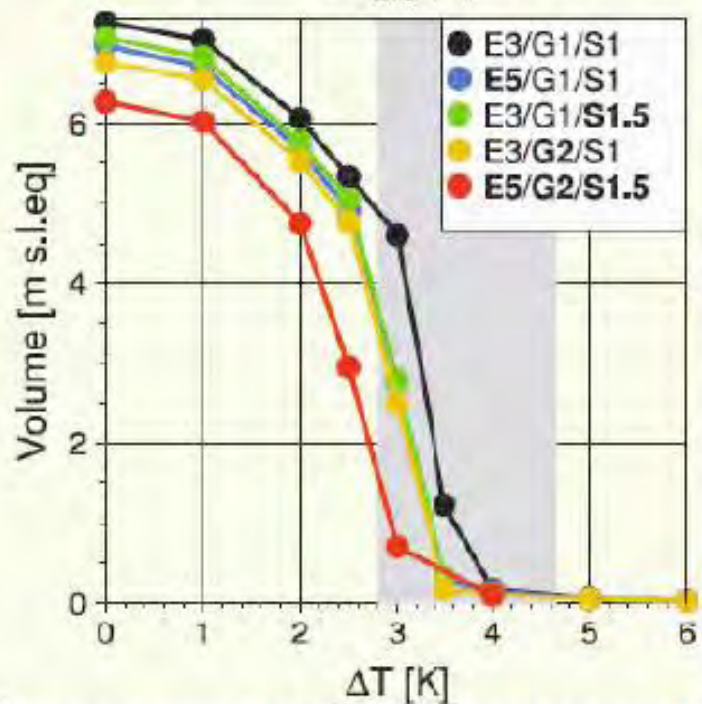
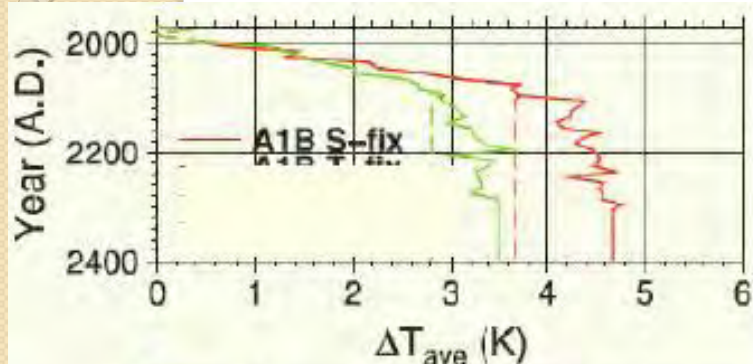
21 世紀末にガス濃度を
A1Bシナリオに安定化させても、
千年後に **2メートル近く** 海面上昇
(長期的負の遺産)

Δsurf. 3000-1970 A.D.



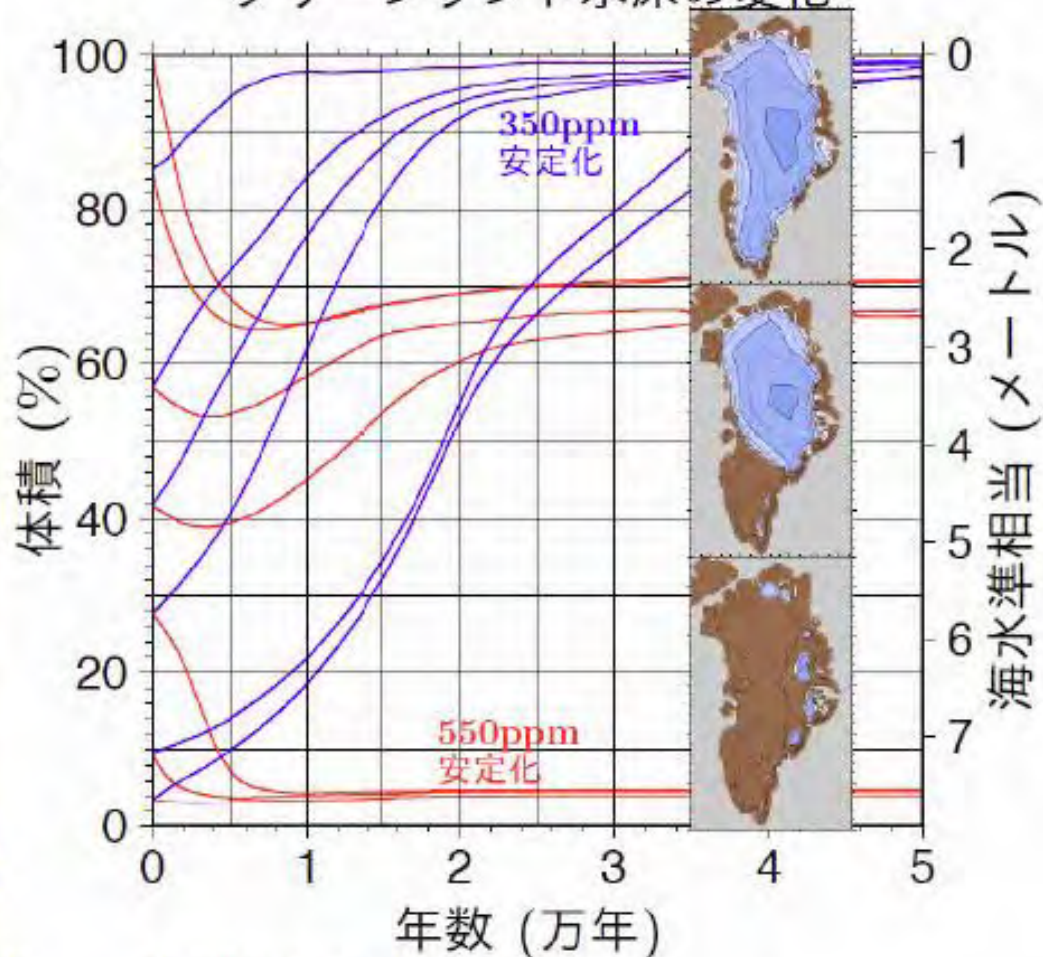
氷床の感度と安定化シナリオ

全球平均昇温 約2°Cで2mより1.5°Cで1.5mと推定



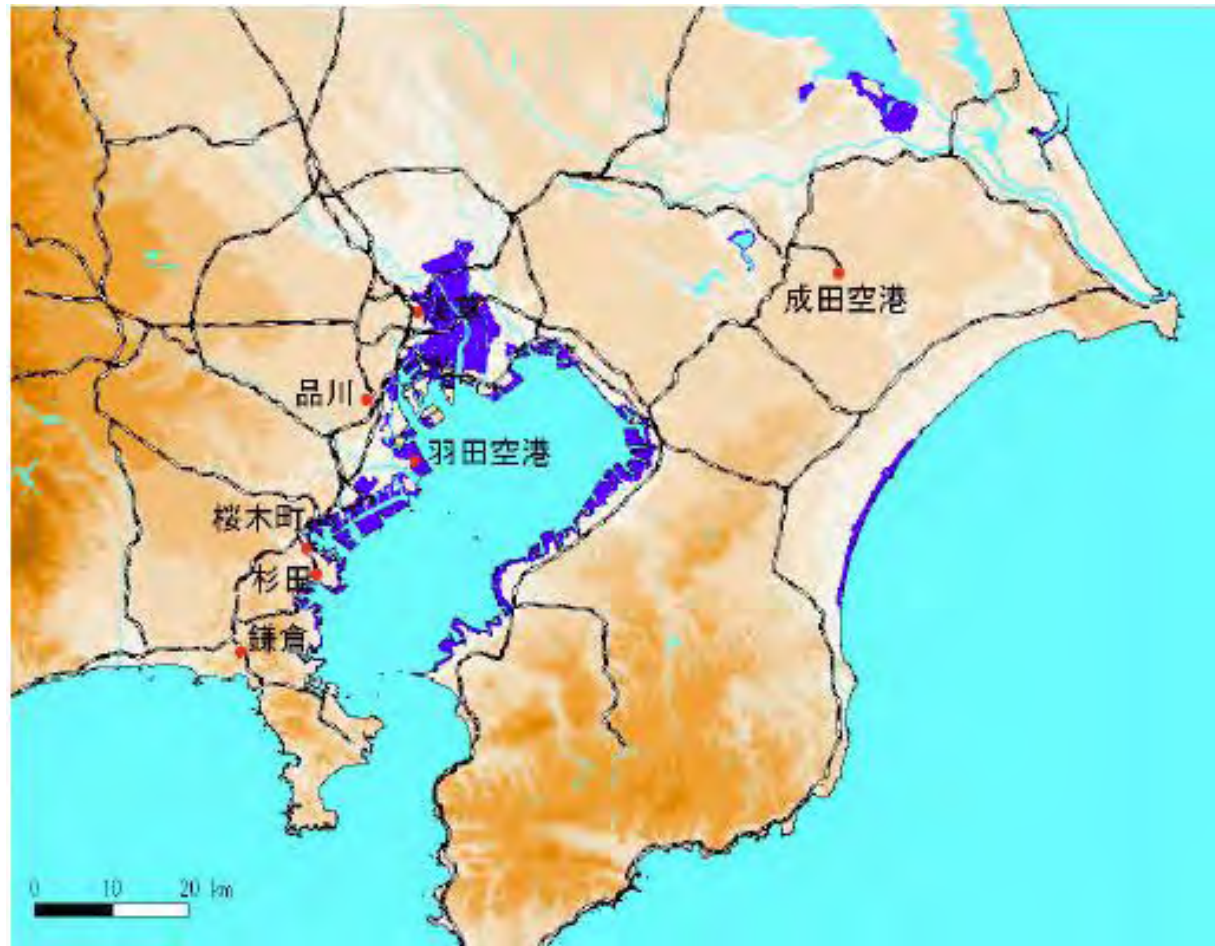
(Saito and Abe-Ouchi, 2006, 2008)

温室効果ガス安定化後の
グリーンランド氷床の変化



(阿部と齋藤による)

Sea level influence of 1m 海水位1m上昇の浸水域

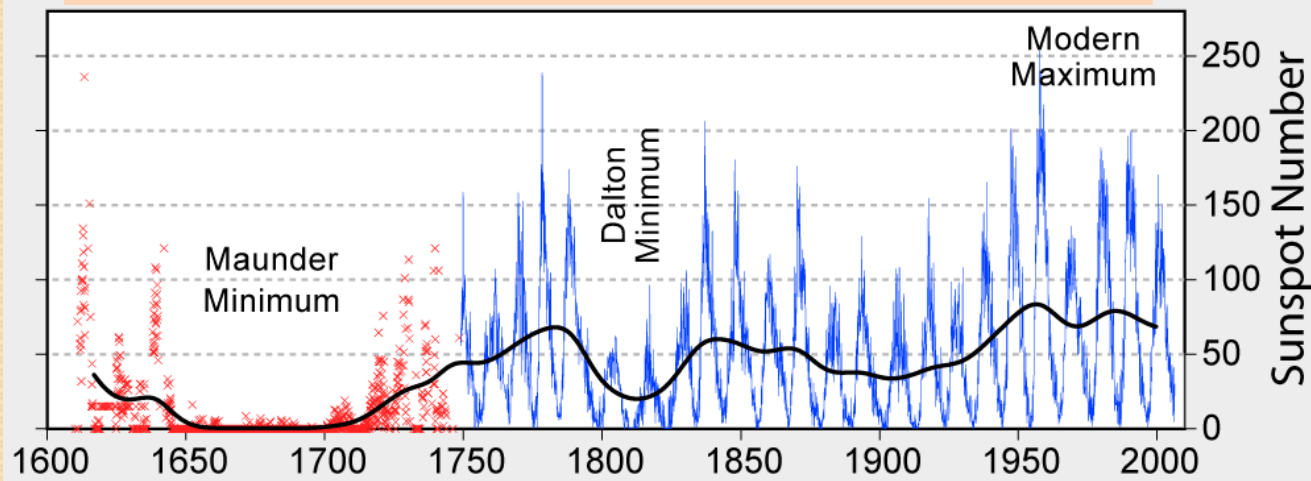


北海道地図株式会社のGISMAPを使用

外的要因で強制される気候変動

➤ 太陽放射(全太陽放射輝度、TSI)

過去400年間（1,600年から）の太陽黒点数の変化



数10年～数世紀の時間スケールにおいて:

現在の太陽活動、したがって放射強度は最大に近いと思われる。

→ 太陽活動の変化は将来低温化の方向に働く可能性大

温度変化の大きさ ΔT 約 -0.5°C

17,18世紀のマウンダー極小期(古気候学の小氷期に対応すると考えられている)の温度低下の掘削孔データにもとづく値

➤ミランコビッチ・サイクル

地球の自転軸変動、公転軌道要素(近日点、離心率)の変化に起因する北半球高緯度(積雪面積大)の夏季の日射量の変化。約9,000年前に最大となり現在減少中。
1,000～5,000年後までは減少続く
最大温度低下 $-0.5 \sim -1.0^{\circ}\text{C}$?

➤火山噴火活動

数10年～ 数世紀の範囲で
現在 (1992年～2010年) のレベルは最低状態にあると思われる。火山噴火に伴う成層圏中エアゾルは現在最小の可能性大

➤外部原因で強制される気候変動全体としては

0.5°C 程度の温度低下が今後2,3世紀中に(太陽放射減少原因) あるいはZ650の最終平衡状態において(1,000～5,000年後、ミランコビッチ・サイクル原因) 起こり得る。一方、確かな昇温要因は見当たらない!

➤ **CO₂ 排出削減における取組むべき課題 工学のテーマ**

しかし、その前にひとつ、**CH₄、N₂Oの濃
度逡減化について**

人間活動で増加しているCH₄ や N₂Oの濃度を減少させる方法はないのか？

これらの温室効果ガスの効果は放射強制力として

- ・0.65W/m² (2005年)に達している。 さらに
- ・0.3W/m² (CFCの寄与、ただし、100年後にほぼ消滅)

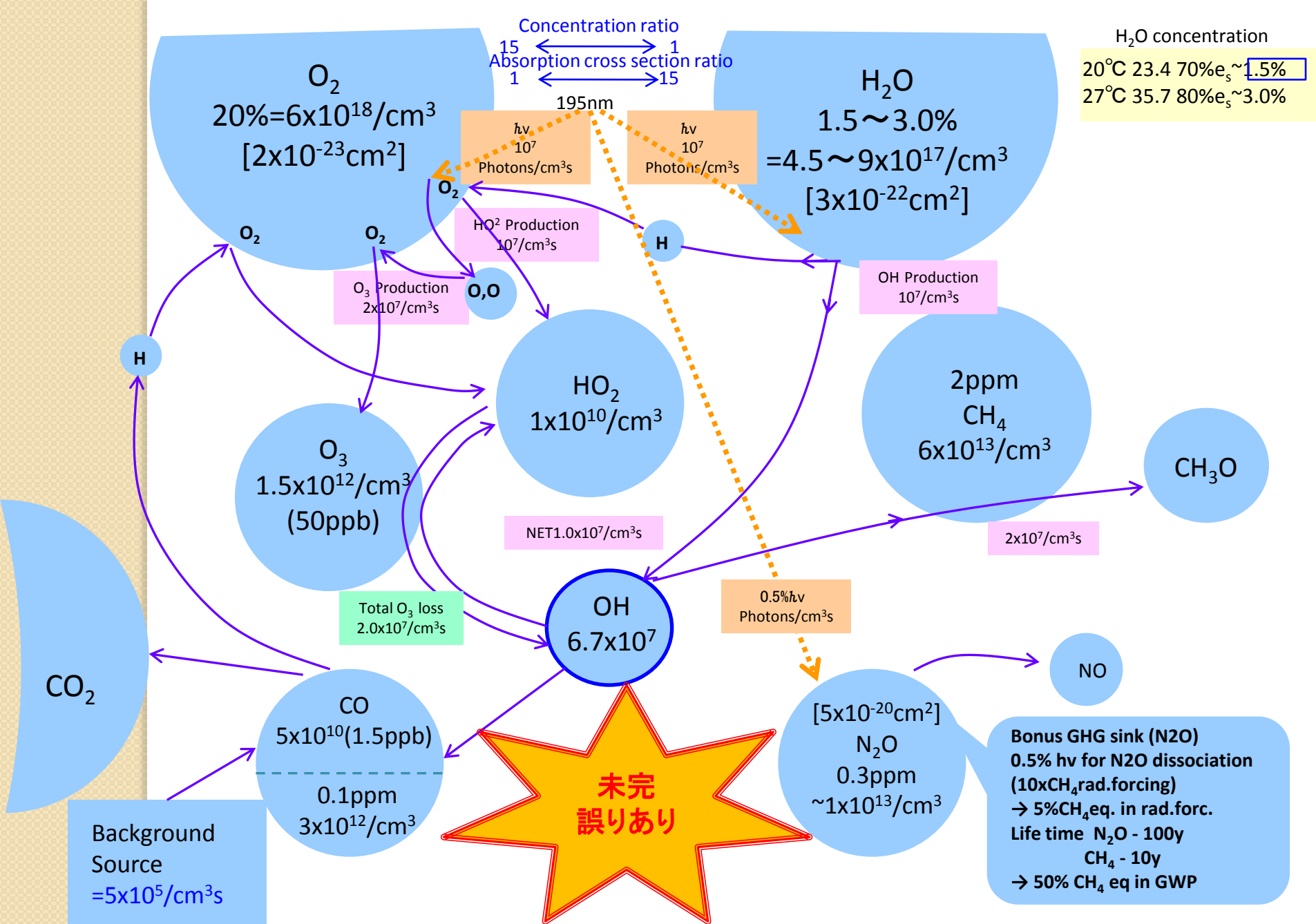
CO₂の効果は

1.66W/m² (2005年)

その他ガスの効果はCO₂ 50ppm相当の大きさを持つ

- RCP シナリオでは将来増加と予想するものもある
- 温暖化、特に北極圏での温度上昇により凍土中や海底下の凍土中に閉じ込められているメタンハイドレートが放出される可能性あり。強さは：100GtC/100年 ~ 1GtC/年
現在の人為発生源 0.5GtC/に近い

→ (メタン・カタストロフに備えるためにも) 気候工学的濃度逡減手法が必要



紫外線(195nm)を照射してOH基を作り、自然の分解プロセスを100倍加速

結語

現在、世界の発展に不可欠のエネルギー需要を満たしつつ、「我ら共通の未来」をどのようにするのか、言いかえれば「人新世」の地球環境のデザインを選択するには、気候科学を含む科学・工学の総合による長期的パースペクティブを持つことが重要である。