

太陽活動変動の気象・気候影響

余田 成男

よでん しげお

(京都大学大学院理学研究科)

第11回宇宙天気ユーザーズフォーラム
2016年6月14日(火曜)

❖ 科研費 新学術領域 2015～19「太陽地球圏環境予測」

未解明の重要科学課題

太陽フレア爆発
発生機構の解明

コロナ質量放出
形成機構の解明

電磁気圏擾乱
現象の機構解明

太陽活動の気候
影響の機構解明

太陽天体物理学

宇宙空間物理学

地球電磁気学

気象・気候学

爆発現象

太陽

長期変動

高エネルギー粒子

太陽風(高速プラズマ流)

太陽放射(VIS, UV, EUV, X)

宇宙放射線

磁気嵐

地球

電離圏嵐

気候変動

科研費
KAKENHI



Prediction of
Solar-Terrestrial
Environment

0. はじめに： 地球、気候に関する基礎知識

❖ 空間スケール： 薄い大気

- (鉛直)/(水平) $\sim 10\text{km}/10000\text{km} = 0.001$
- スケールレンジ： $10^7\text{m} \sim 10^{-9}\text{m}$

❖ よく混ざっていない非均質大気

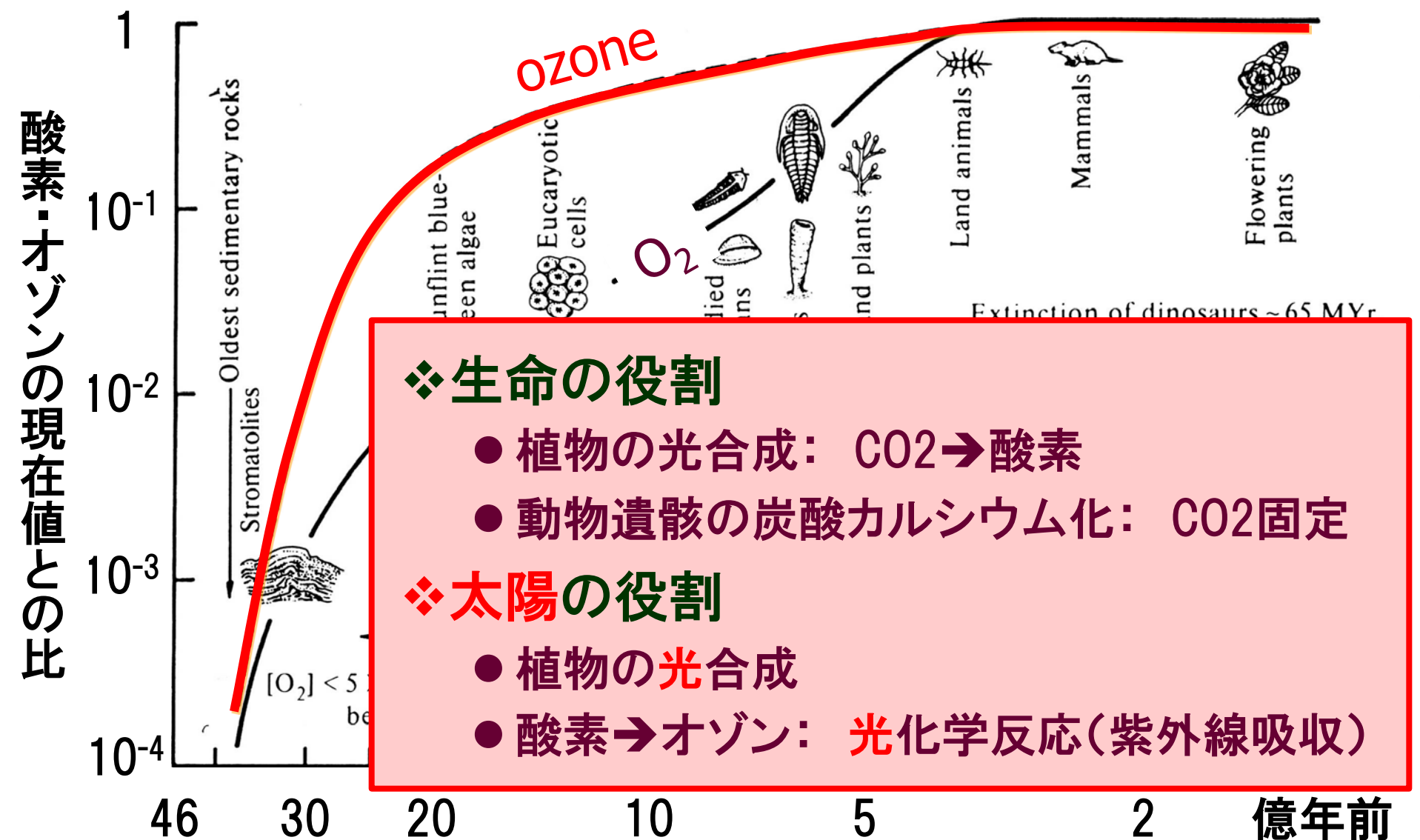
- 3次元的な認識・記述の重要性
- 物質・エネルギーの輸送を担う大気運動

Gore (2006) “An inconvenient truth”

地球から昇る太陽を宇宙空間でとらえたデジタル処理画像 1984年

❖ 時間スケール： 地球大気の進化

- 地球システムの変遷： 水の存在、生命の誕生、...



❖ 生命の役割

- 植物の光合成： $\text{CO}_2 \rightarrow \text{酸素}$
- 動物遺骸の炭酸カルシウム化： CO_2 固定

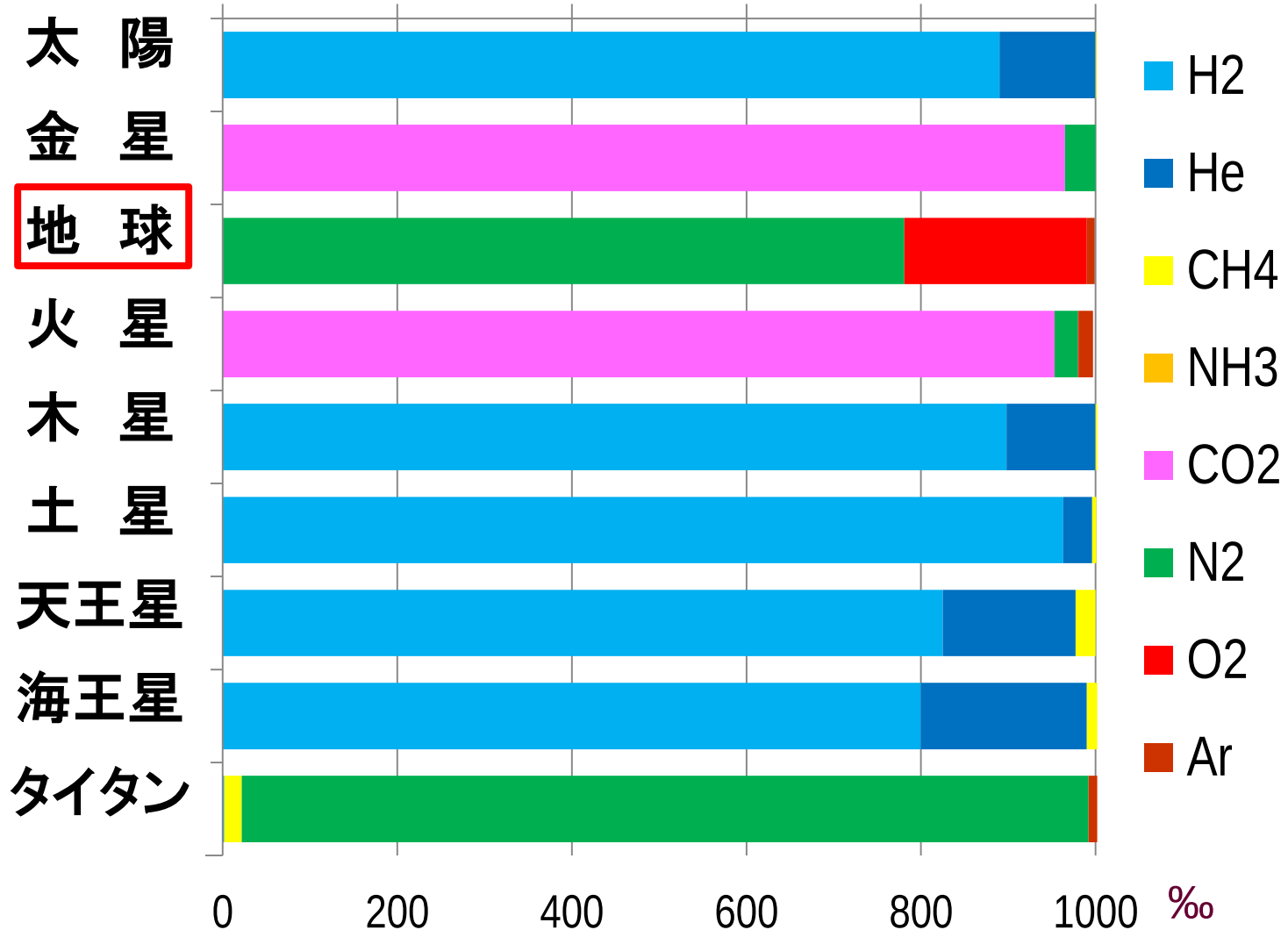
❖ 太陽の役割

- 植物の光合成
- 酸素 $\rightarrow$ オゾン： 光化学反応(紫外線吸収)

❖ 地球大気のユニークさ

● 太陽・惑星・衛星の大気の組成比

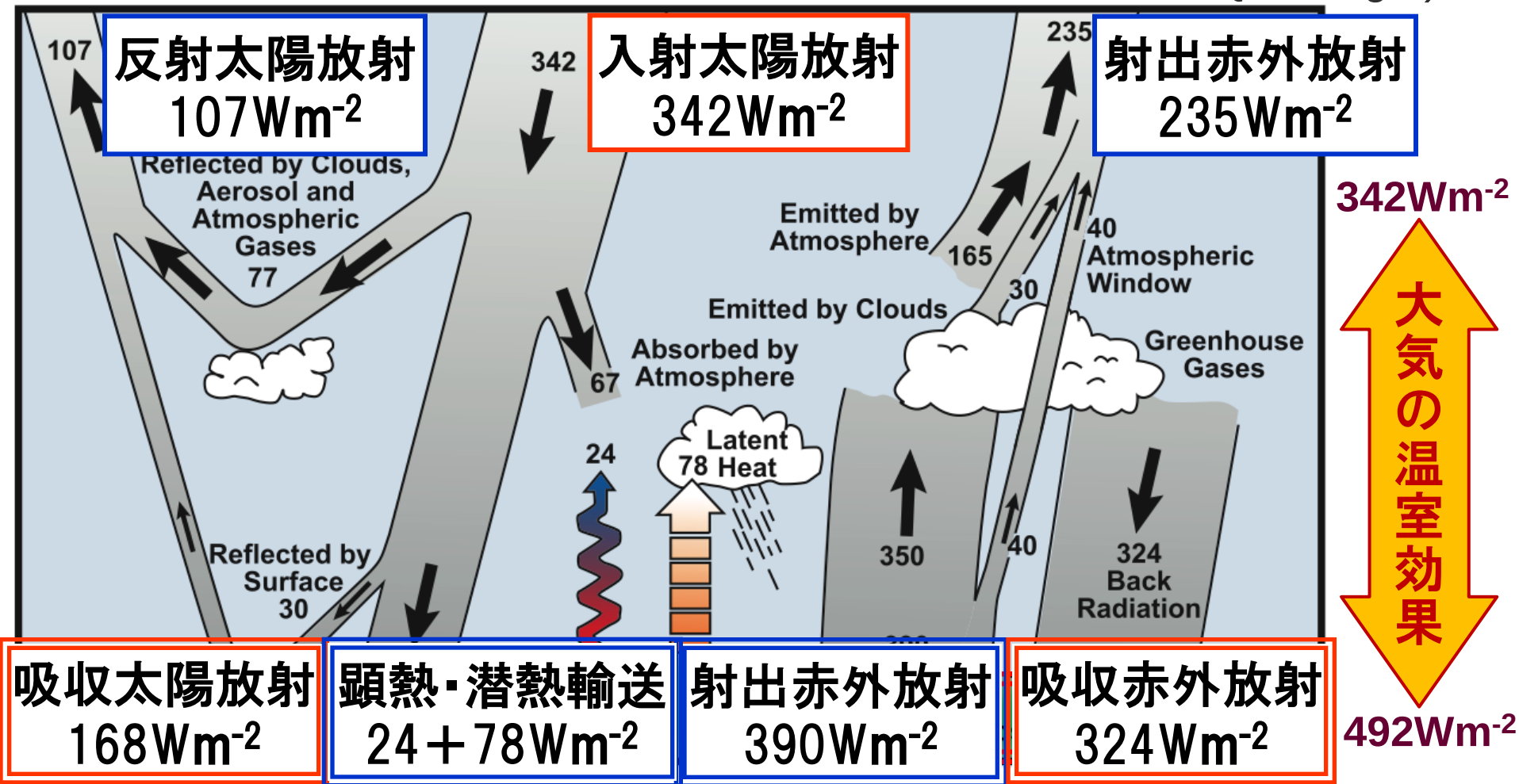
➤ cf., Wayne (2000; p.2)



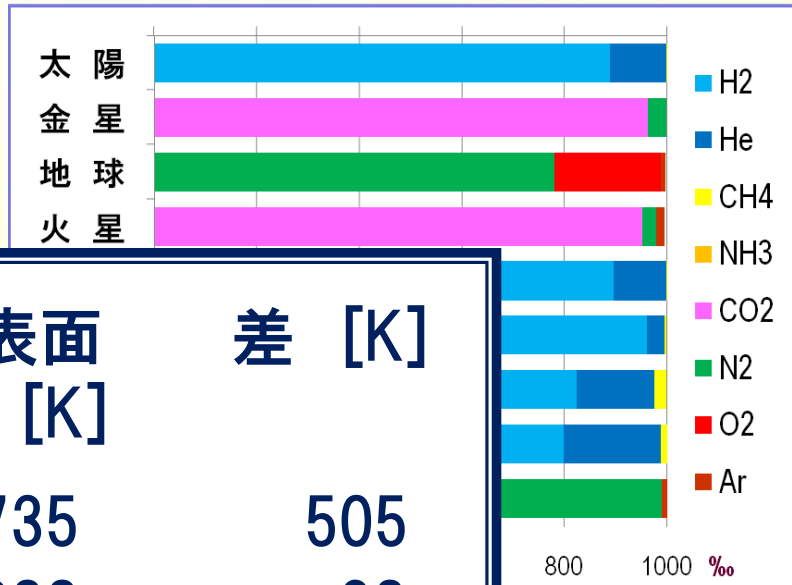
❖ 大気の温室効果（エネルギー収支の大気上下端間の差）

- H₂O、CO₂、CH₄、・・・などの微量な大気分子
- 地表からの赤外放射の大部分は**大気**で吸収 → 大気を加熱
- 大気からの赤外放射は等方的（上にも下にも）
- **下向きの赤外放射が余分に地表を加熱**

IPCC AR4 (2007;
FAQ 1.1 Fig.1)



❖ 惑星毎に特徴的な温室効果



	大気上端 温度 [K]	惑星表面 温度 [K]	差 [K]
金星	230	735	505
地球	250	288	38
火星	220	230	10
木星	130	---	---

(Houghton、2002、小倉、1999、に基づく)

❖ 水(氷・水蒸気)の役割

● 海： 液体としての水

地球にのみ存在 → 生命の生まれたところ

● 水蒸気： 強力な温室効果気体

金星は「暴走温室効果」の結果

❖ 地球温暖化研究のなかで

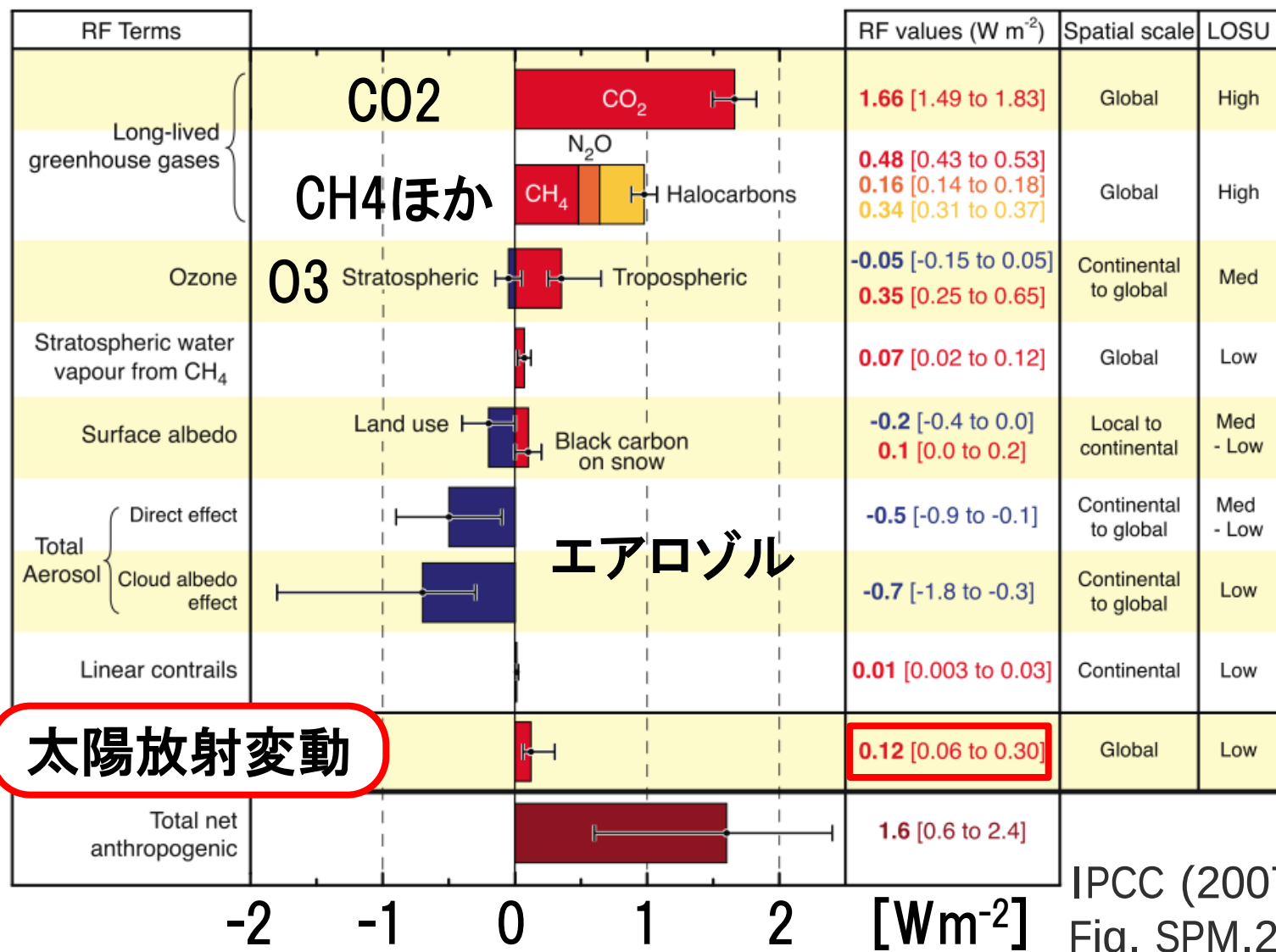
● IPCC 第4次評価報告書 (2007)

➤ 放射強制力(全球平均)の見積もり

$$235 \text{ Wm}^{-2} \times 0.001 = 0.235 \text{ Wm}^{-2}$$

人為起源

自然変動



©IPCC 2007: WG1-AR4

2. 地球の気象・気候に影響する太陽活動変動

❖ 太陽活動の諸変動

1) 太陽放射の変動

- 全量(TSI)の変動
- 波長毎の変動
紫外線域で大

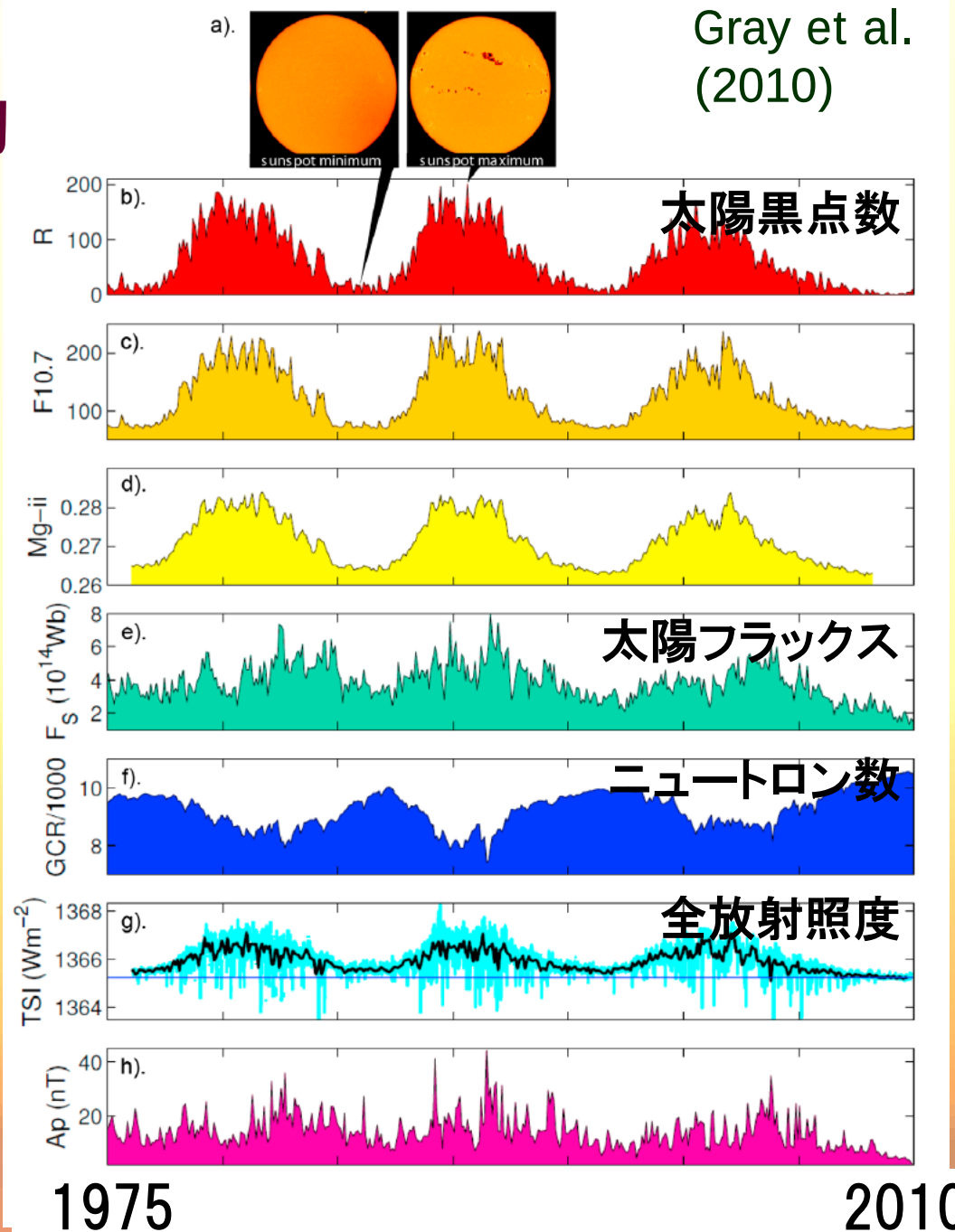
2) 太陽風の変動

- 太陽プロトン現象
- 高エネルギー電子

3) 2)の影響による

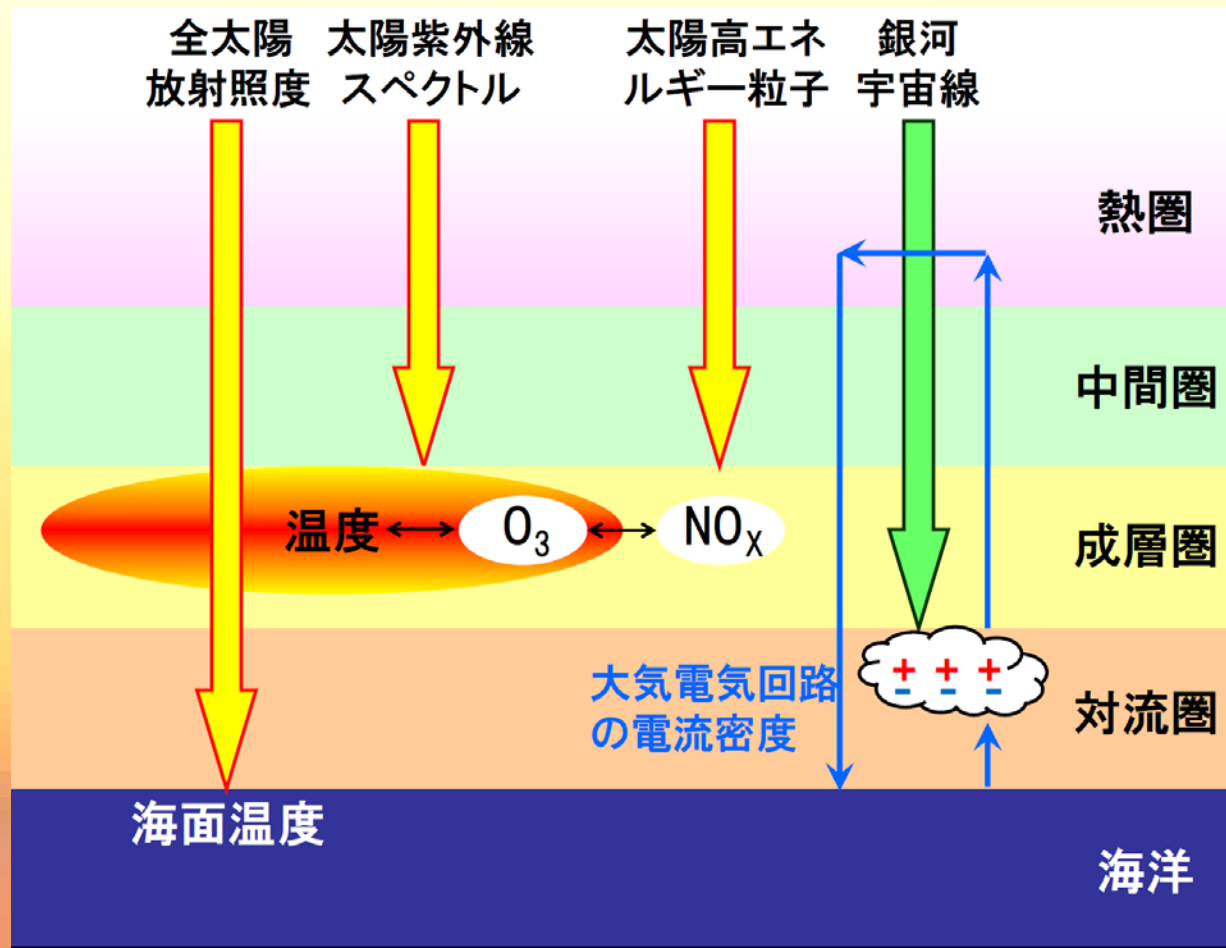
銀河宇宙線の変動

- 空気シャワー



❖ 太陽活動の諸変動が気象・気候に影響する可能性

- 放射 → 温度場
- 紫外線 → 大気微量成分(オゾンなど)
- 高エネルギー粒子 → 大気微量成分(NO_xなど)
- 宇宙線 → 大気電場、イオン、...



❖大気上端に到達するエネルギー

Haigh et al. (2005) “*Influence of solar activity cycles on earth's climate*”

- 全放射照度 1366 W/m^2
- 太陽風 (10^3 eV) $\sim 10^{-4} \text{ W/m}^2$
- 磁気圏降下荷電粒子 (10^4 eV) $\sim 10^{-5} \text{ W/m}^2$
- 銀河宇宙線 (10^8 eV) $\sim 10^{-5} \text{ W/m}^2$

❖11年周期変動

- 全放射照度 (0.1%) 1.37 W/m^2 ($\div 4$)
- 0次元(全球大気平均)放射平衡温度に対する影響:

$$\triangleright (1-A)F_s = 4\sigma T^4$$

$$\Delta T = 0.25T(\Delta F_s/F_s) = 0.25 \times 288 \times 0.001 \sim 0.07 \text{ [K]}$$

❖気候に影響するには **増幅メカニズム** が必要

- 紫外線域変動 (1~10%)
- 太陽風変動、銀河宇宙線変動 (～数十%)

3. 太陽活動変動と気候変動との相関

❖ 11年周期変動と関連する電離層の変動

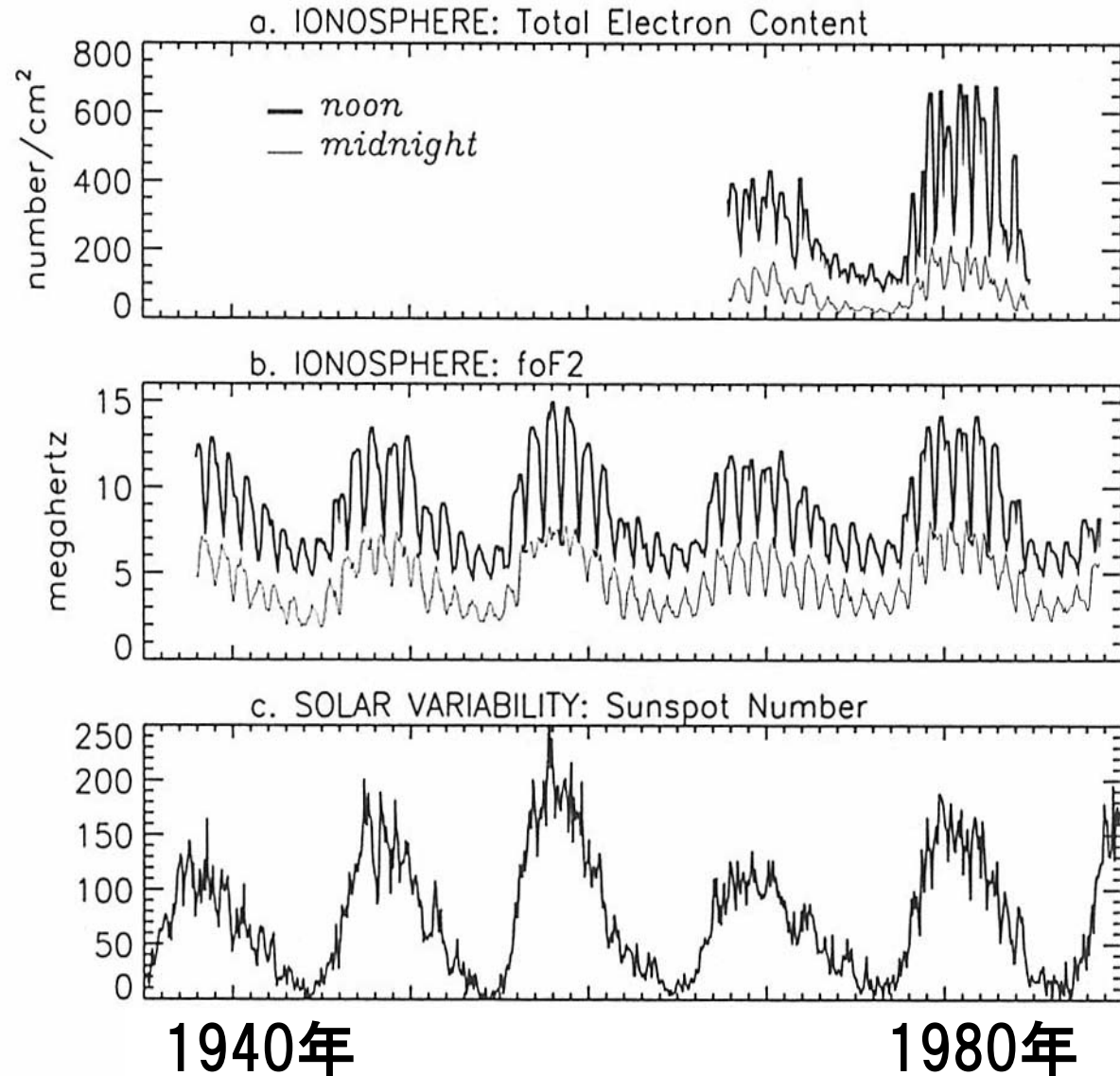
● Lean (1997)

➤ 全電子数

➤ F2層臨界振動数

高振動数側では
電離層での反射
なし

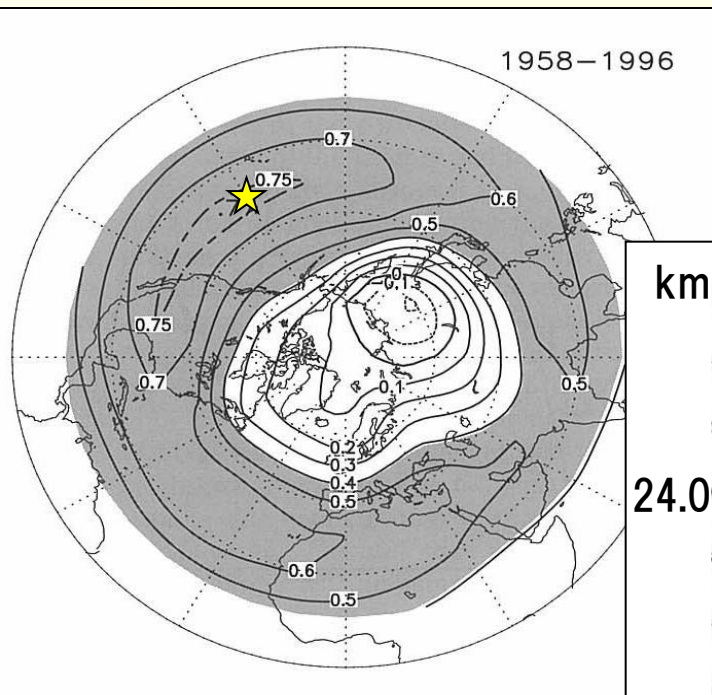
➤ 太陽黒点数



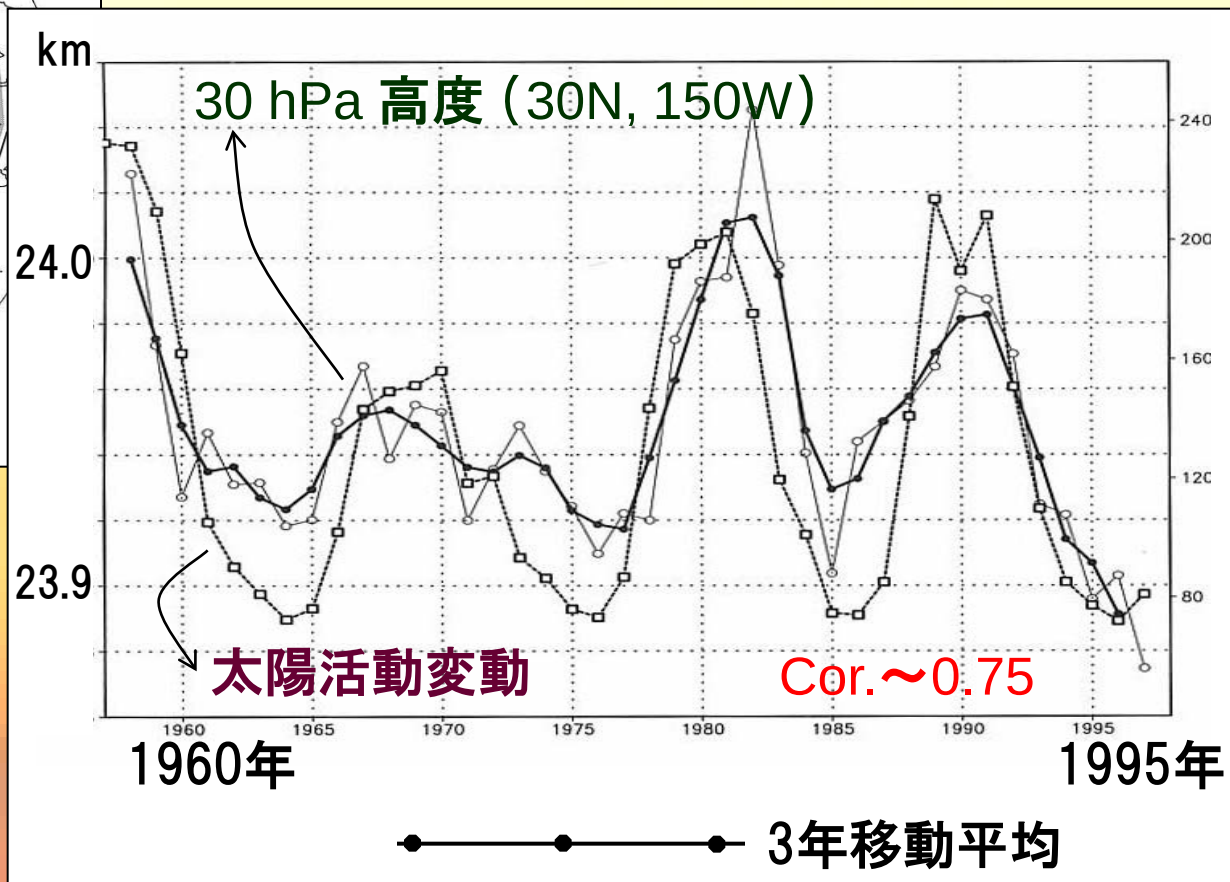
❖ 11年周期変動と関連する成層圏の変動

● Labitzke and van Loon (1999)

➤ 波長10.7cm太陽電波と年平均 30-hPa 等圧面高度場との相関



陰影部:
統計的有意性 99%以上

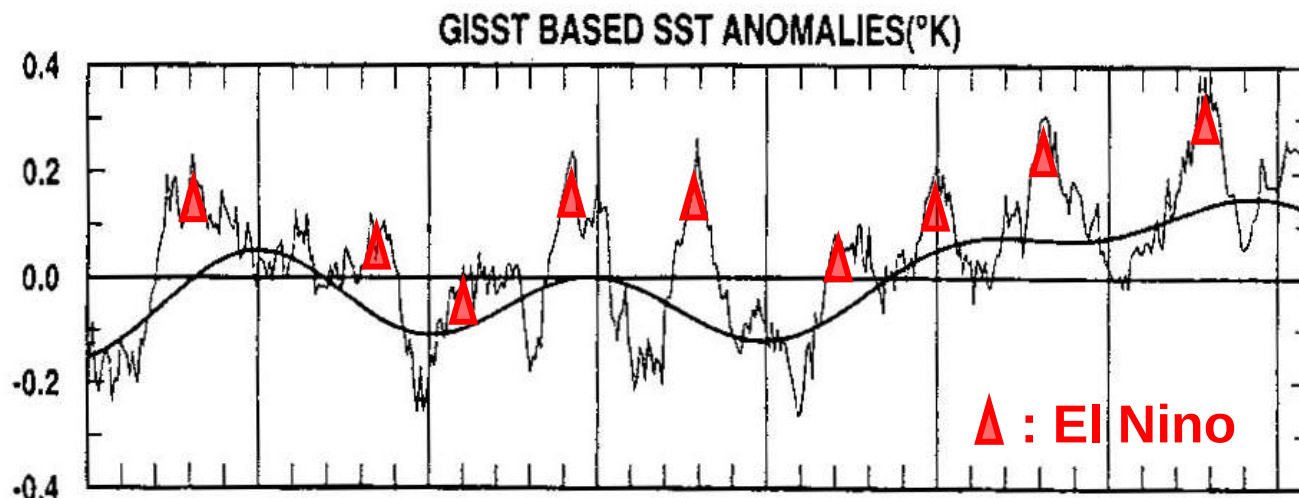


❖ 11年周期変動と関連する対流圏、海洋の変動

● White, Lean, Cayan, and Dettinger (1997)

➤ 海洋観測データ

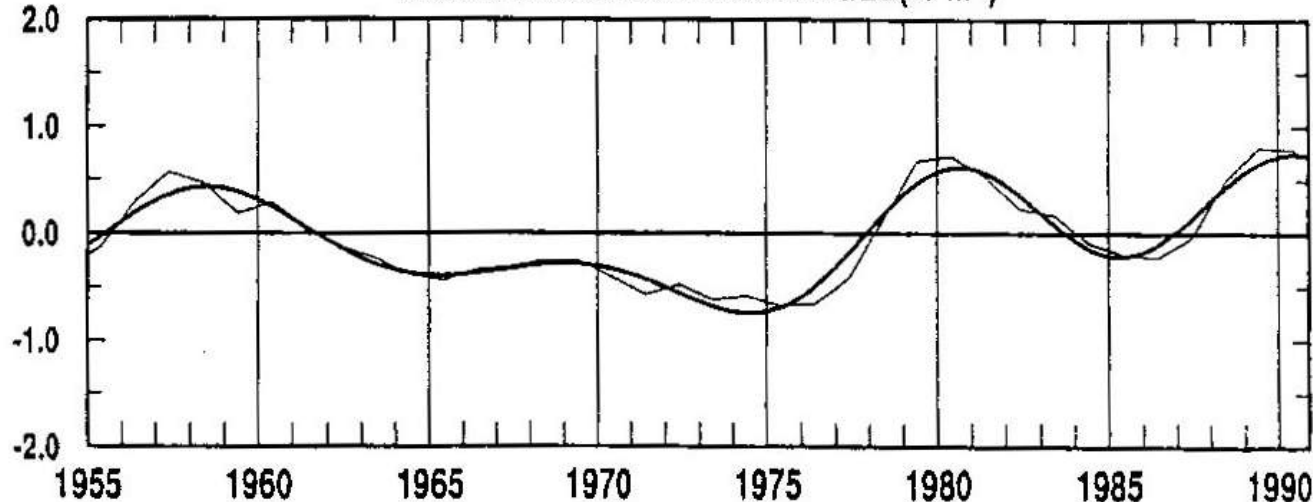
40S-60N平均
海面温度偏差



1955年

SOLAR IRRADIANCE ANOMALIES(W M⁻²)

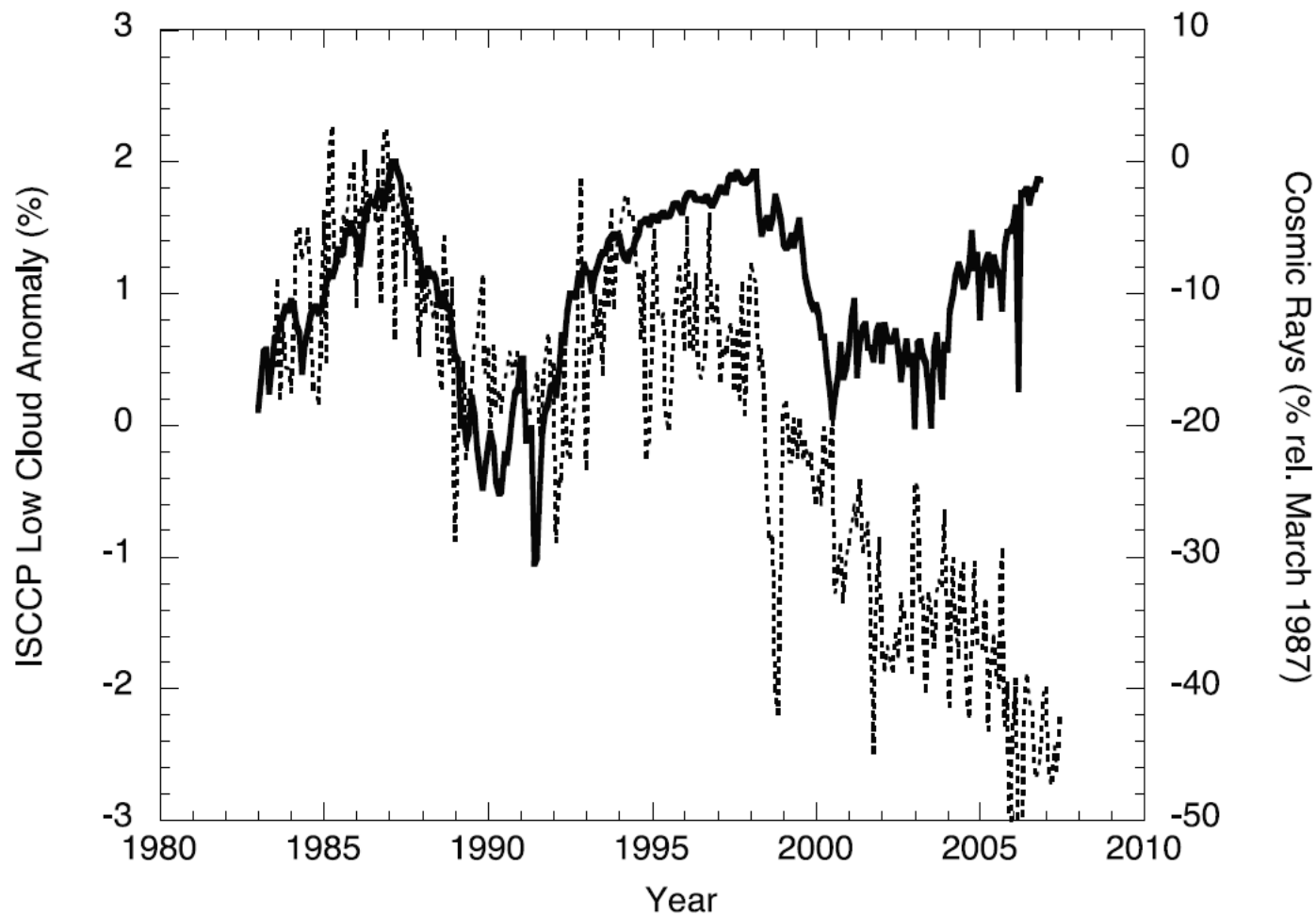
1985年



太陽放射変動

● Marsh and Svensmark (2003; Gray *et al.*, 2010)

➤ 全球平均した下層雲



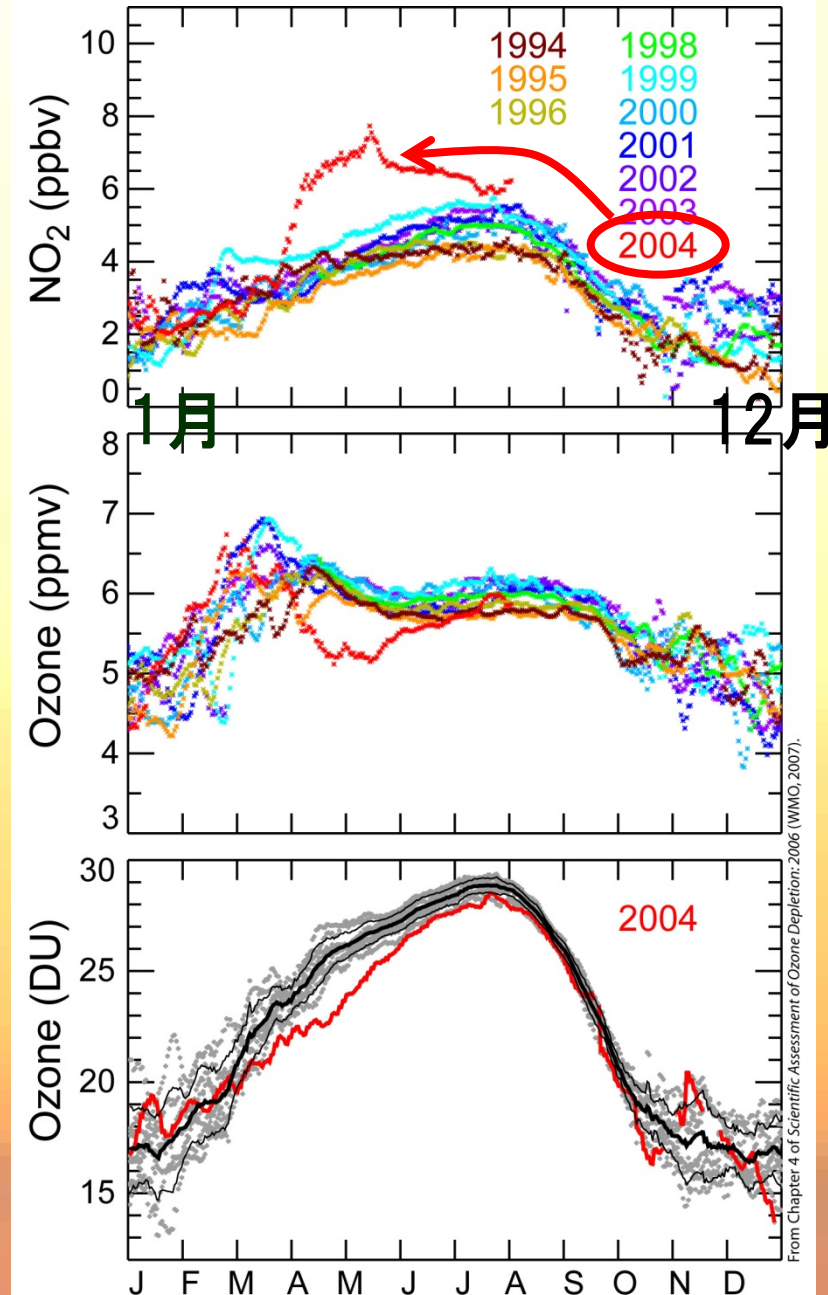
—— 銀河宇宙線変動（地磁気低緯度でのニュートロン数）

---- 全球下層雲面積変動（「修正後」ISCCP データ）

❖ 短時間変動: 太陽プロトン現象と関連する成層圏の変動

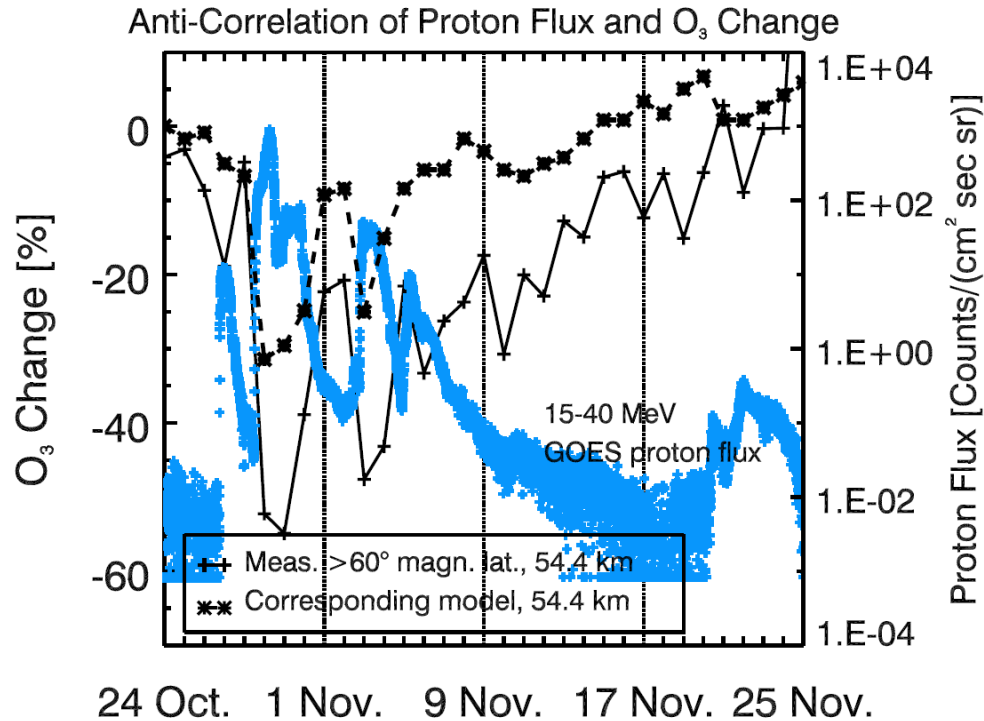
● Randall et al. (2005)

- Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006 収録
- 北半球上部成層圏 (40 km)での NO_2 、 O_3 およびオゾン全量
- 2003年ハロウィーン・イベントの影響
 - 中間圏・熱圏での NO_x の生成
 - 成層圏 NO_2 の増加 ← 輸送
 - 成層圏 O_3 の減少 ← 化学反応
 - ...
- 数か月にわたる影響
 - 長寿命物質の擾動

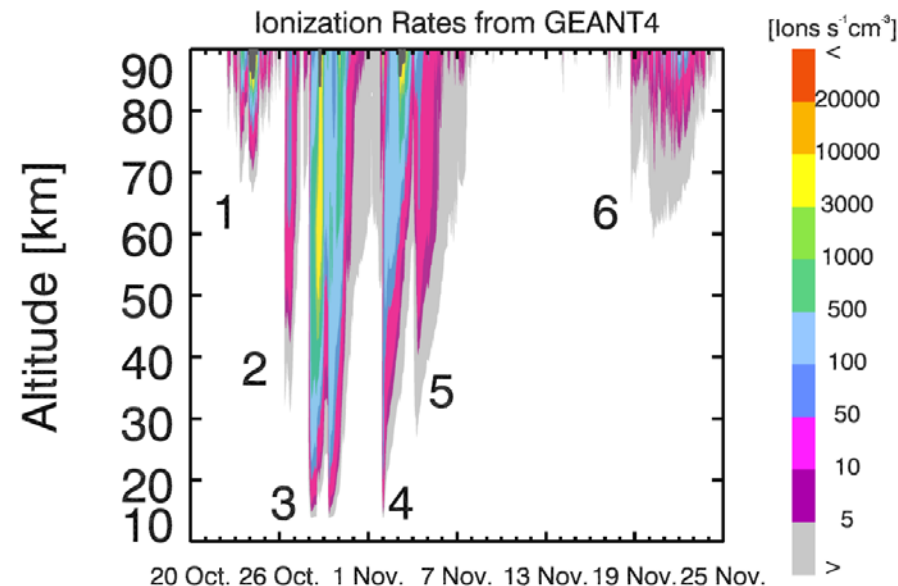


● イベント直後の大気微量成分応答 (Rohen et al., 2005)

➤ プロトンフラックスと成層圏オゾン(+)の時間変動



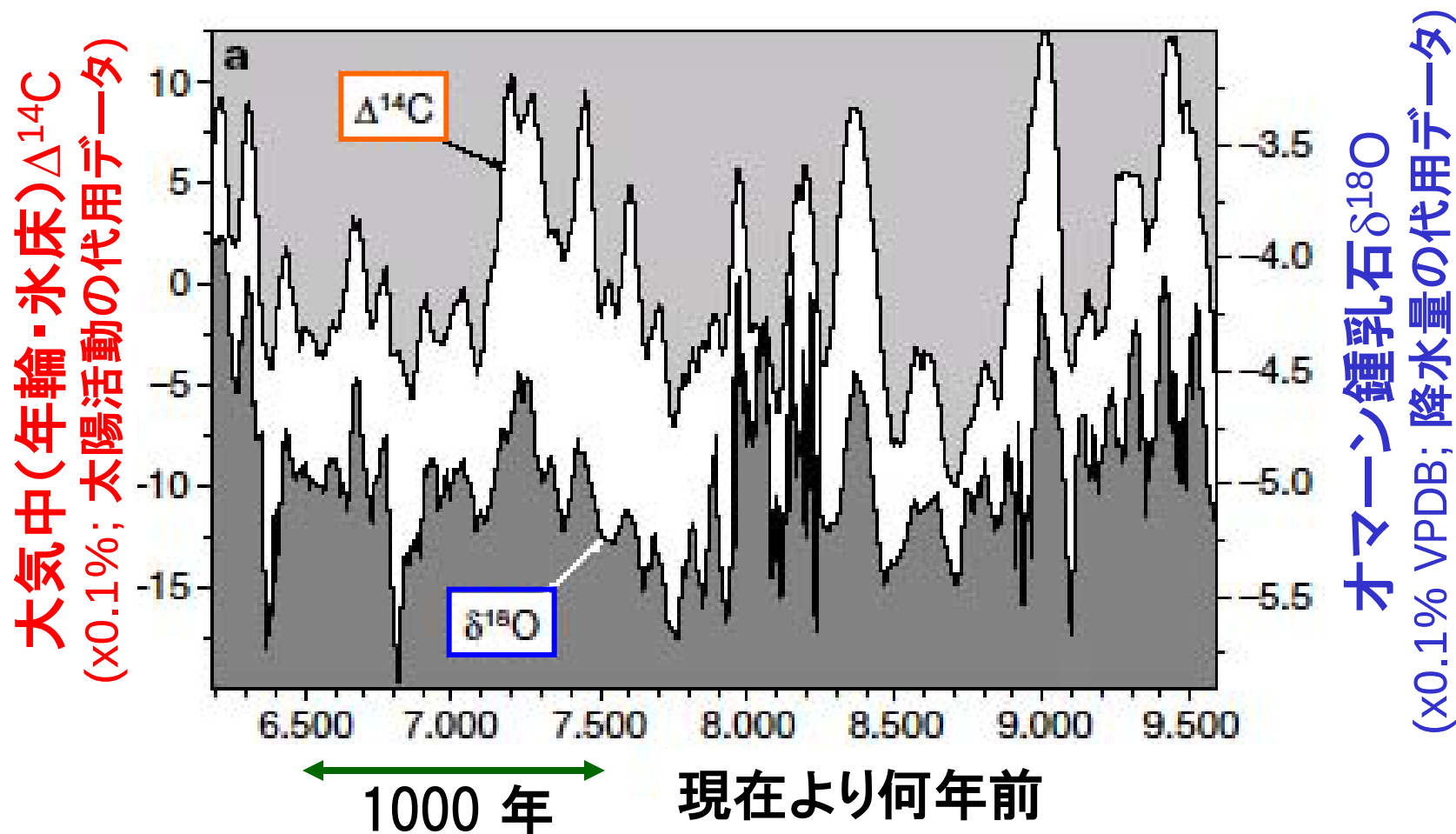
➤ 大気のイオン化率の 高度-時間変化の見積もり(→)



❖ 長時間変動: 地質学的データに残された変動

● Neff et al. (2001)

“Strong coherence between solar variability and the monsoon in Oman between 9 and 6 kyr ago” *Nature*, **411**, 290



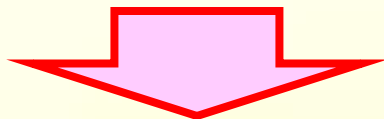
❖ 過去には

- 太陽活動変動の気候影響に関する研究への「偏見」
 - 観測データに対する制約： 局所性、観測期間、・・・
 - ヴィクトリア湖の例
 - 因果関係： ブラックボックス or 「風が吹いたら桶屋が儲かる」
 - 観測データで検証されていない「学説」

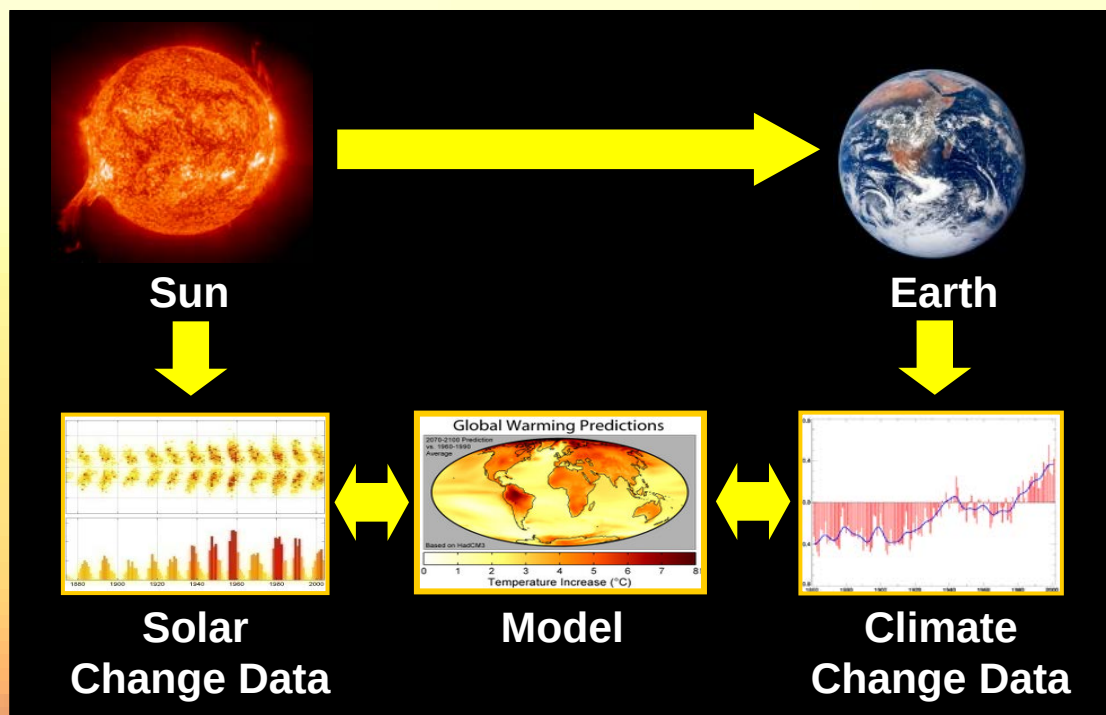
❖ 最近の状況： 新たな動機付け

- 高品質データの蓄積
 - 衛星観測データ： 全球分布、大気圏外
 - 新たな地質学的データ： 長期間データの高精度試料分析
- コンピュータの飛躍的发展
 - 気候モデルの精緻化
 - データ解析手法の高度化
- 地球温暖化と関連した興味増加
 - 人為的影響 ←分離→ 自然変動（太陽活動、火山噴火、・・・）

- ❖ 太陽活動変動と気候変動との相関を示す観測データ
- ❖ 因果関係は、依然としてブラックボックスか未検証の学説



- ❖ 太陽活動変動と気候変動との関係を理解するには、気候モデルを用いた「数値実験による検証」が必要



Gray et al.
(2009)

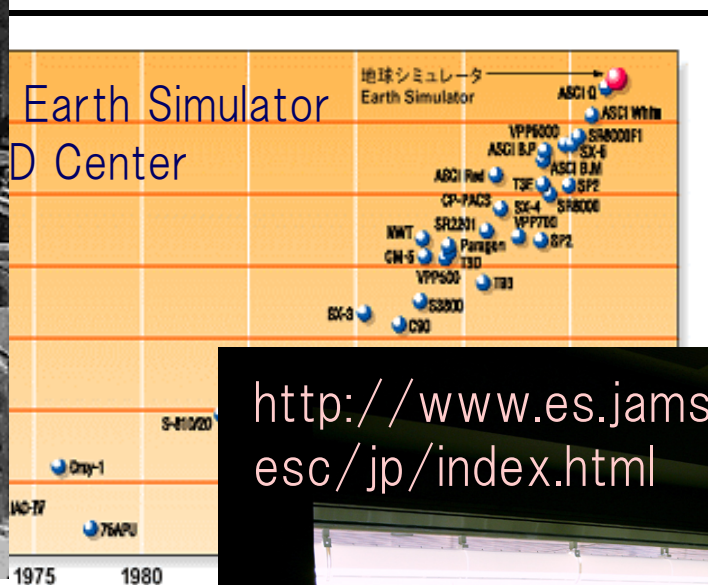
コンピュータ シミュレーション科学の挑戦

4. 地球システムモデルを用いた数値実験

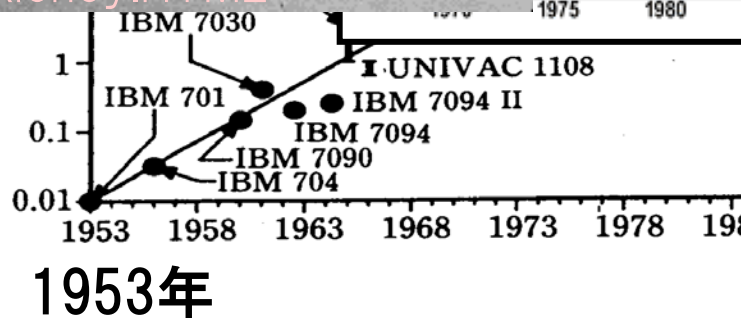
❖ 数値天気予報モデル→気候モデル→地球システムモデル

❖ 計算機性能・技術の飛躍的発展

● 計算速度、メモリーサイズの指数関数的な成長



<http://www.es.jamstec.go.jp/esc/jp/index.html>



❖ 気候モデル、地球システムモデルの概観

● 始まりは数値天気予報モデル（1950年～）

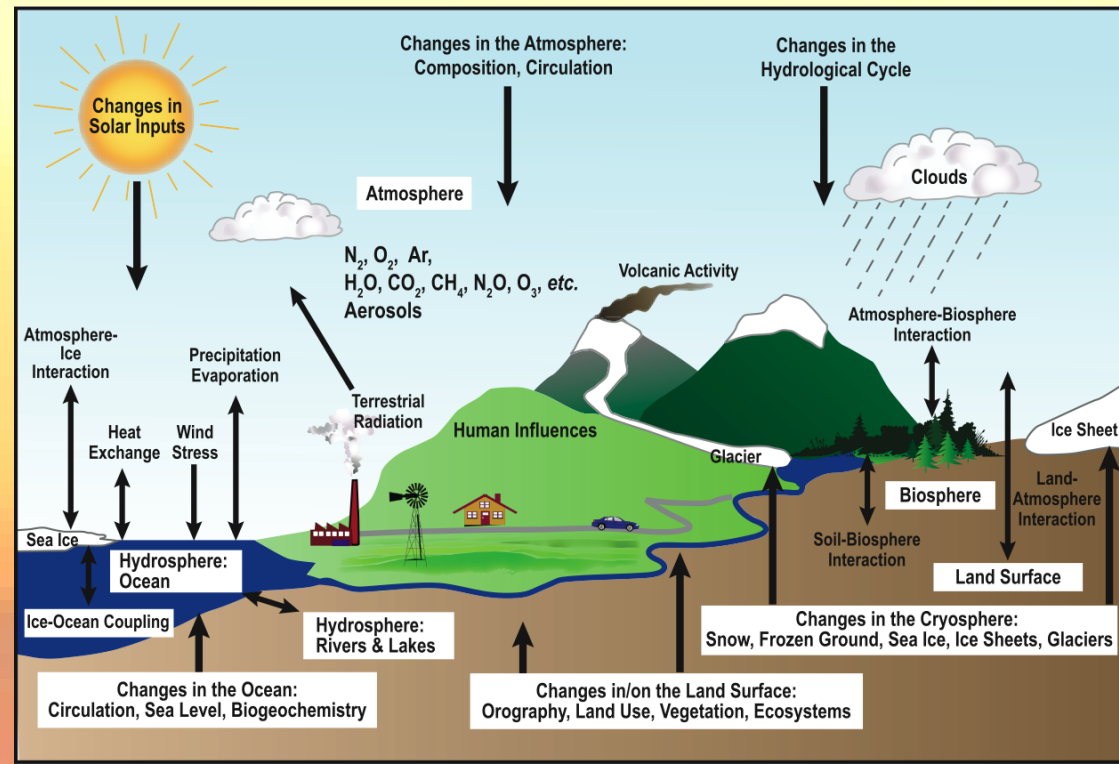
- 物理法則に基づいて大気の将来をコンピュータで予測
- 日々検証されてきた実用に耐えるモデル

● 初期値問題としての気象予測

- 全球的な気象観測による現状(初期値)把握
- カオス(Lorenz, 1963): 予測の限界

● 気候モデル、地球システムモデルへの改変

- より長い時間スケールでは変動するもの:
海洋、陸水、雪氷、
陸面、植生、
大気組成、...
- それらの支配法則
(方程式系)の構築



❖ 気候モデルで計算していること

● 平衡状態としての気候の形成

- 初期値に依存しない平衡状態への収束 = 気候
- 検証： 現在気候の再現

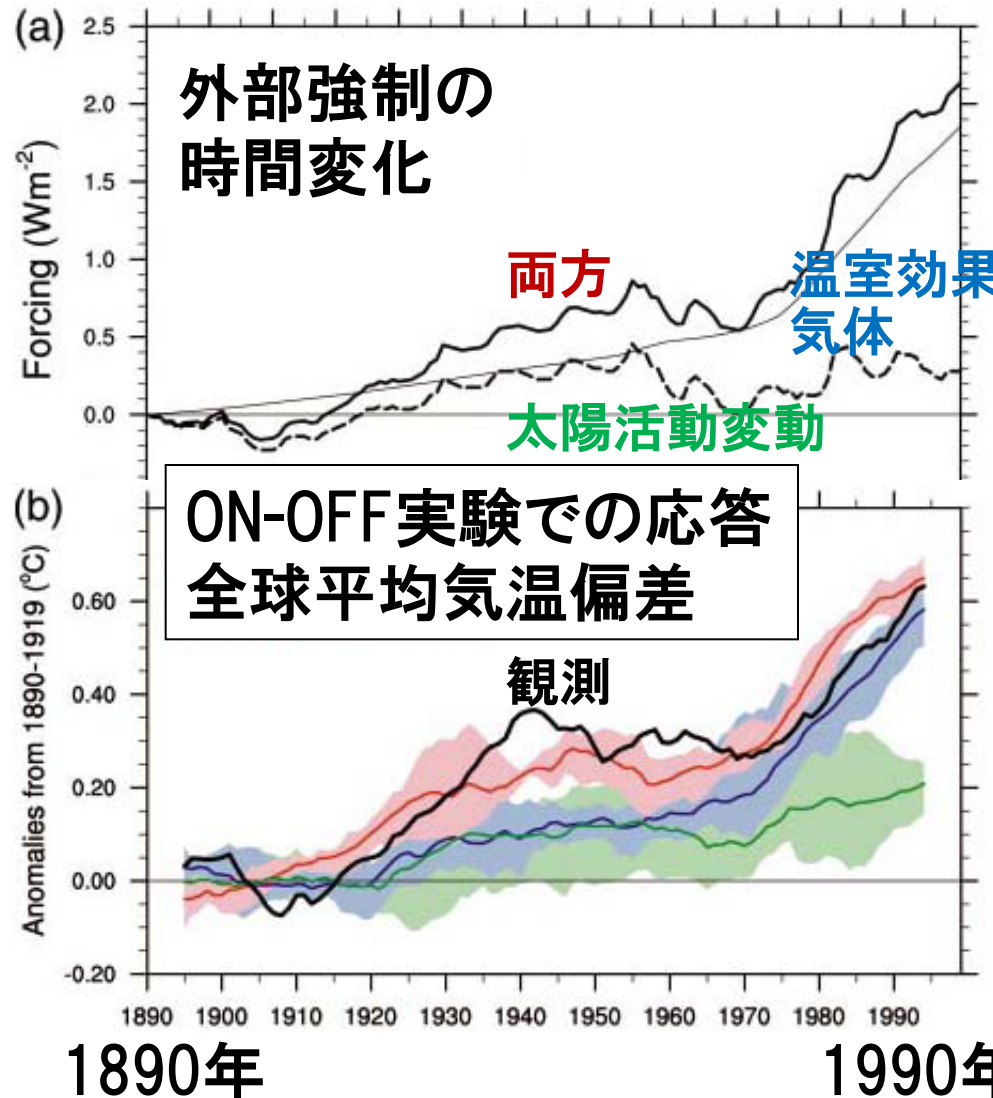
● 気候変化実験

- 外部条件変化に対する応答
変化シナリオ
ON-OFF実験 →
時間スライス(条件固定)

● 気候変動実験

- 外部条件変動に対する応答
周期変動
イベント
- 内部変動
外部条件一定でも存在
システムの緩和時間依存

Meehl et al. (2003)



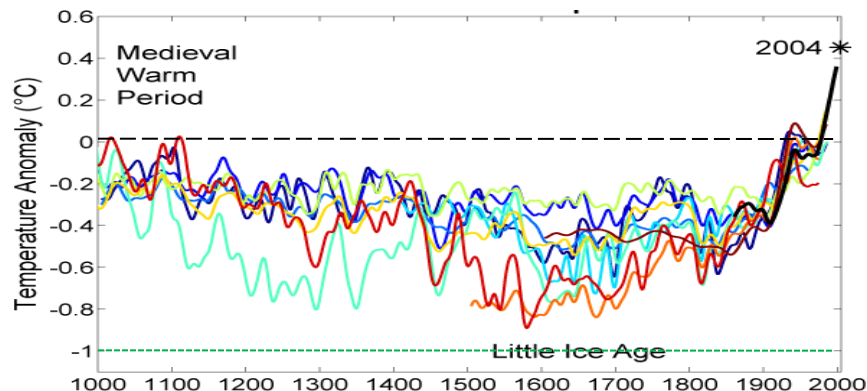
❖ 過去1000年の再現実験

● 変化シナリオ:

- 火山噴火
- 太陽活動変動
- 温室効果気体
- パラメータ値スウィープ実験:
マウンダー極小期の減少率

0.65% 0.25% 0.1%

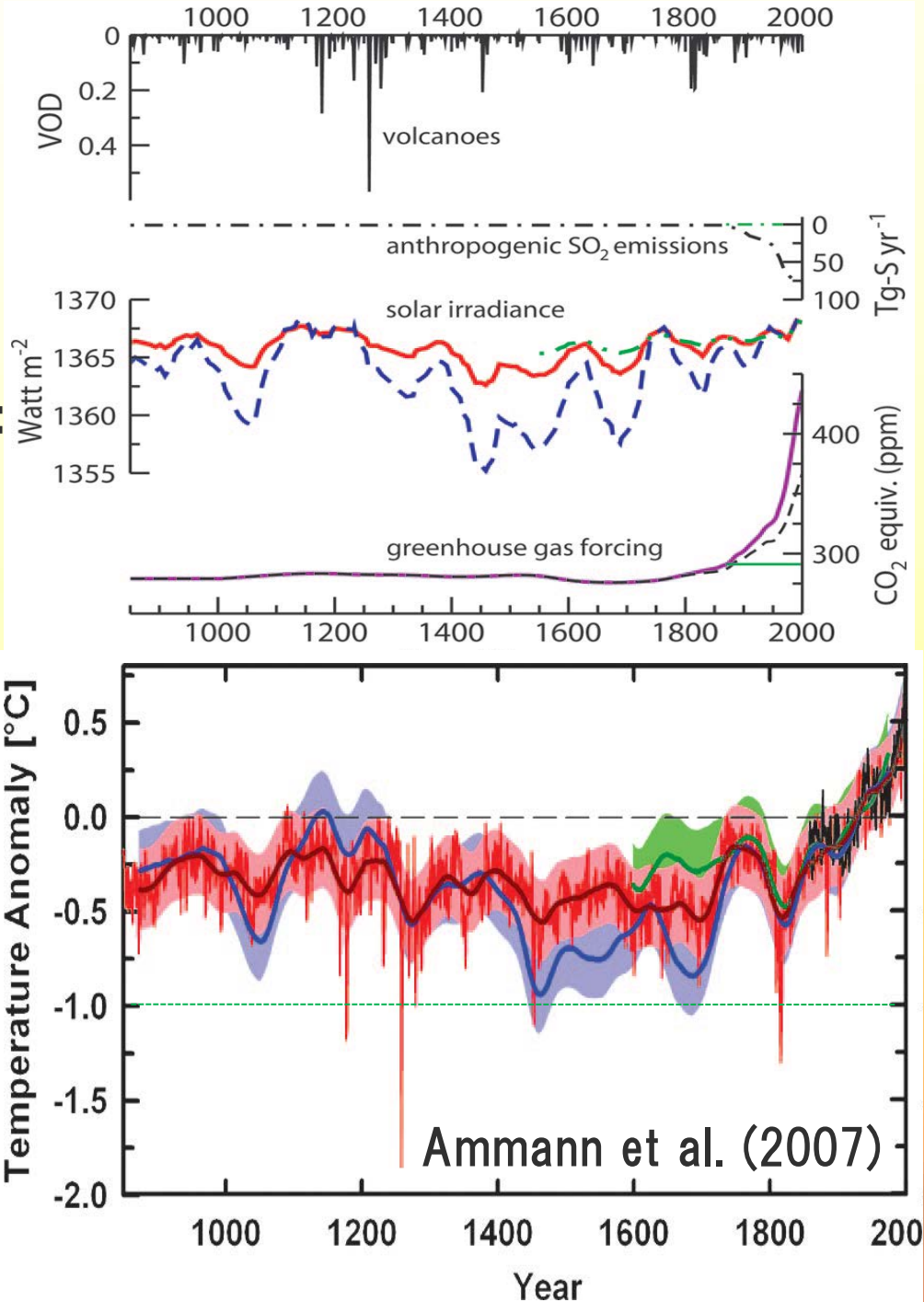
地質学的に「復元」した気温変動



1000年

1800年

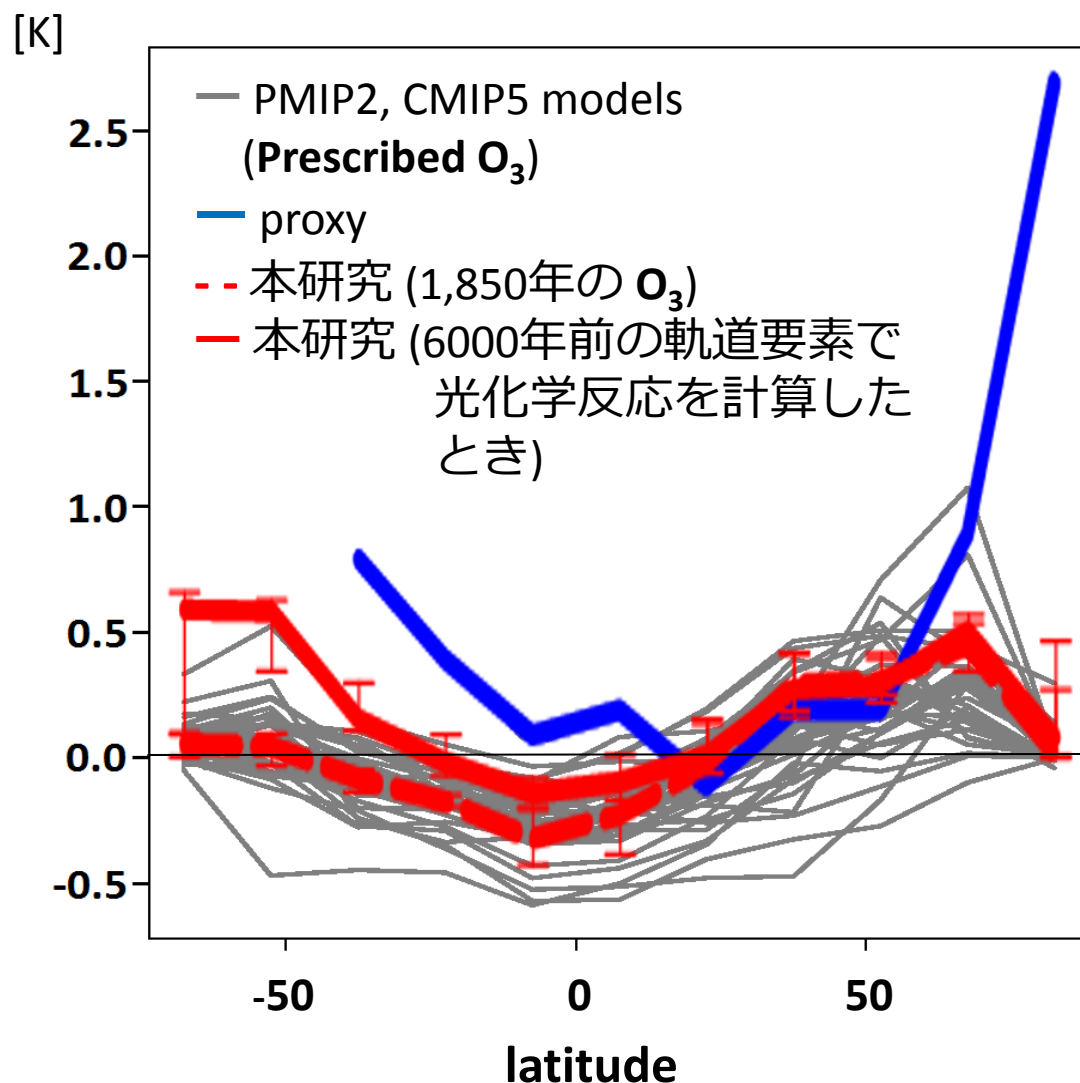
<http://en.wikipedia.org/>



❖ 最近の研究より

- Noda et al. (2016)
- 気象研究所地球システムモデルによる完新世中期(6千年前) 気候再現実験

オゾン化学反応の
重要性



5. おわりに

❖ 過去には

● 太陽活動気候影響研究に対する「偏見」

- 観測精度
- 観測データ数(領域)の制約
- 観測期間の制約

❖ 最近では

● 高品質データの蓄積

- 先端技術を駆使した観測、大アンサンブル平均
- 全球をカバーする人工衛星観測
- 高精度高時間分解能な地質学的試料分析

● 時代の要請

- 地球温暖化と関連した興味が増加

● コンピュータの飛躍的发展が気候研究の新時代を切り拓く

- 気候モデルの精緻化 (あるいは、不確実性の低減)
- データ解析手法の高度化

終





Project for Solar-Terrestrial Environment Prediction

