
温室効果のメカニズムと気候影響

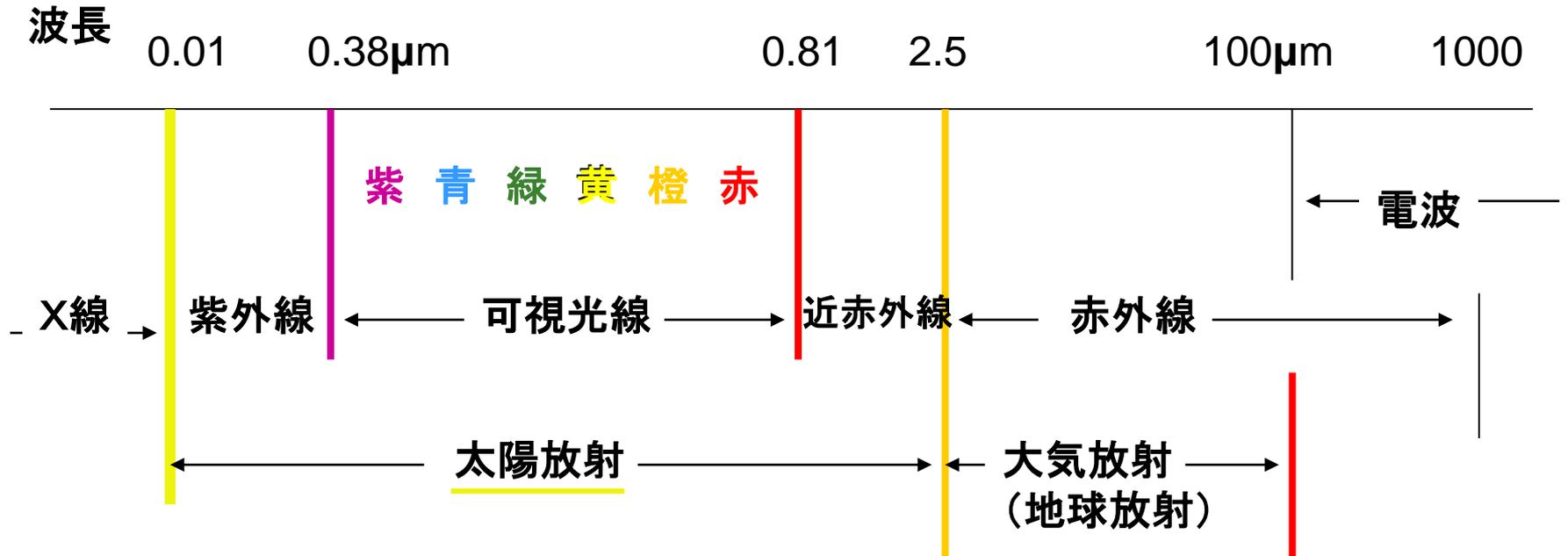
太田 幸雄

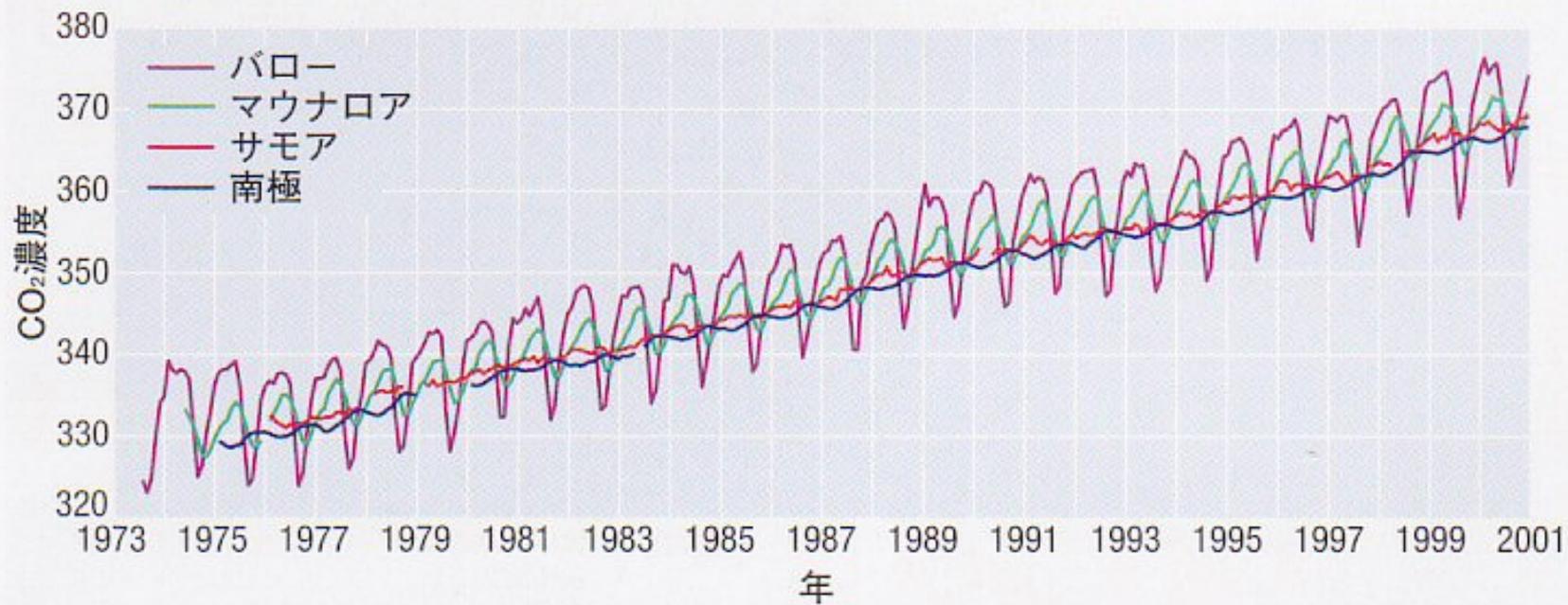
幌延深地層研究計画札幌報告会2018

講演 平成30年8月22日

電磁波

($1\mu\text{m} = 10^{-6}\text{m} = 10^{-3}\text{mm}$)

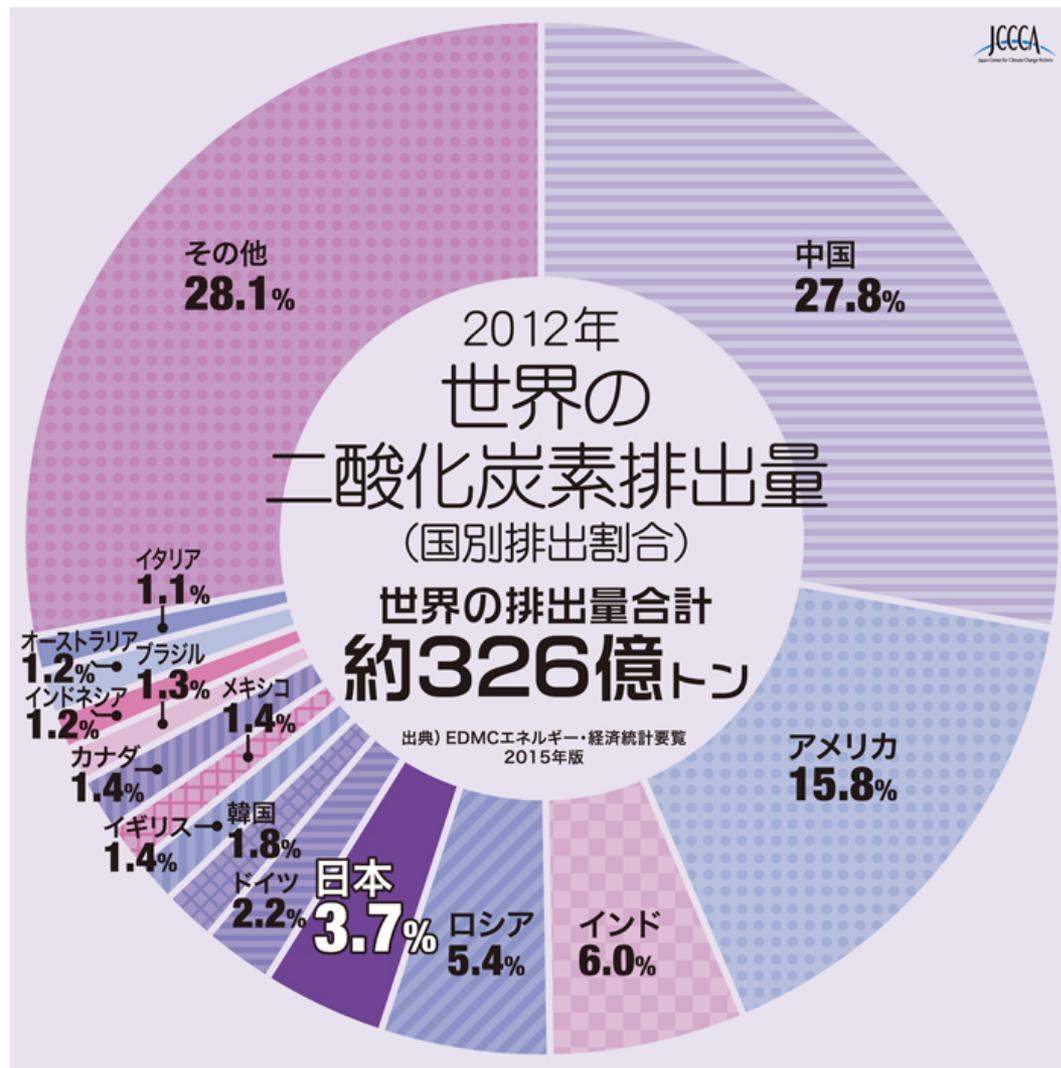


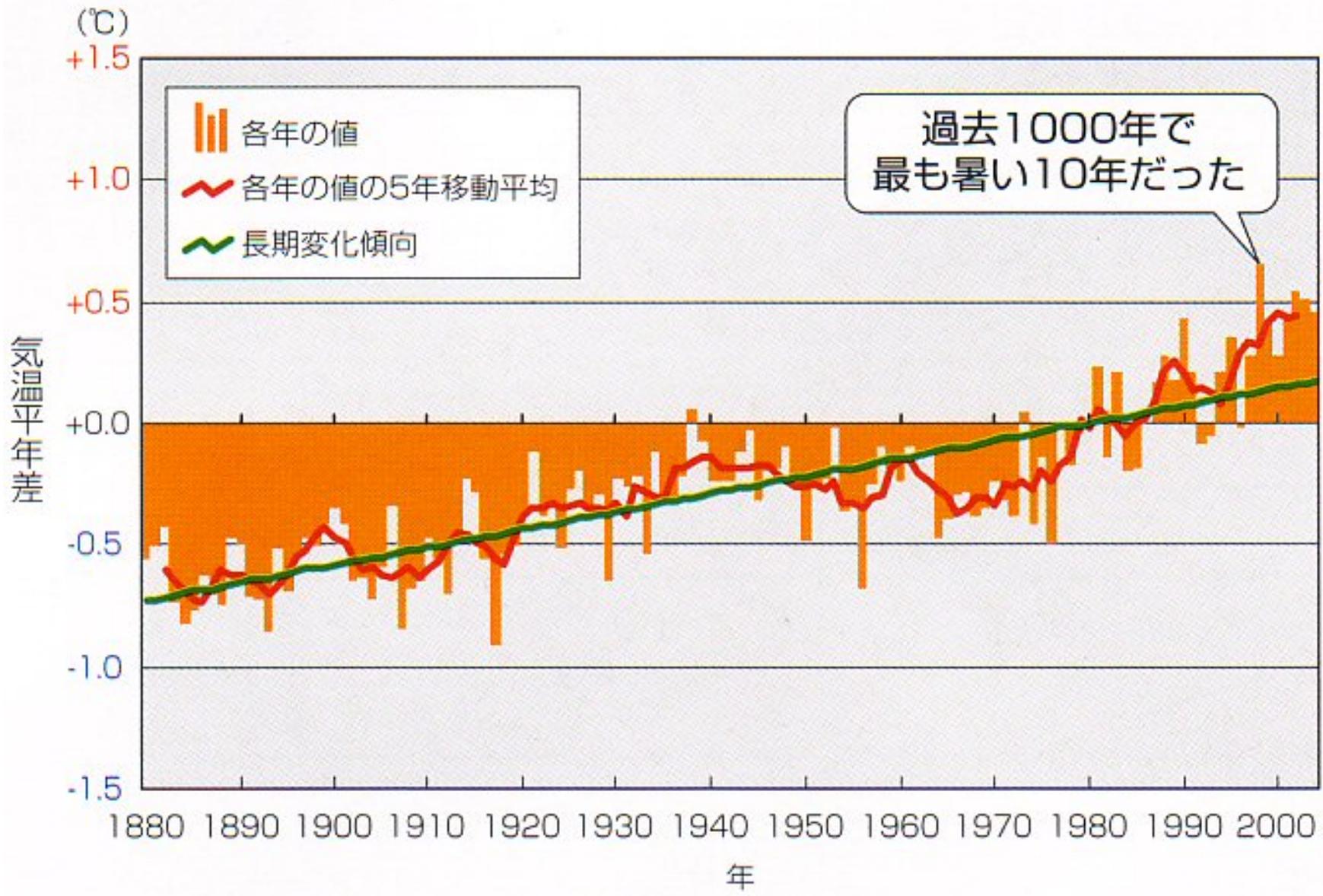


1. 大気中のCO₂濃度の増加

- 大気中のCO₂濃度は 400 ppmv (2016年現在) で 年に 1.5 ppmv 前後の割合で増加している。
(1 ppmv = 100万分の1 (体積/体積))
- 増加の原因:
 - 化石燃料の燃焼
 - 森林の伐採、燃焼
- 化石燃料燃焼により排出されたCO₂ のうち
 - **58 %** → **大気中に残る**
 - 42 % → 海洋および森林に吸収されている

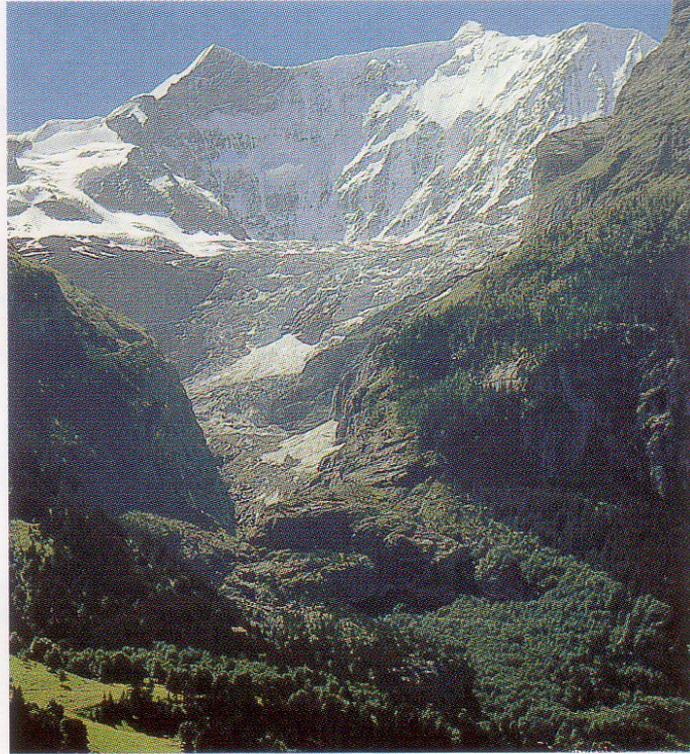
世界各国の二酸化炭素排出量(2012年)





世界の年平均地上気温の変動(陸上のみ)(1880~2004)

スイス・グリンデルワルド氷河： 1820年（左）と1974年（右）



スイス・グリンデルワルドの氷河は、小氷期が17世紀半ばに頂点に達して以来の世界的な山岳氷河の後退の一例である。左側の絵は1820年頃の氷河で、右側の写真は1974年に撮影された。

カナダのクラン
デル大氷原：
1906年（上）と
1998年（下）



エベレスト山麓の東ロンブク氷河の後退 (1921年8月(上)と2008年10月(下))

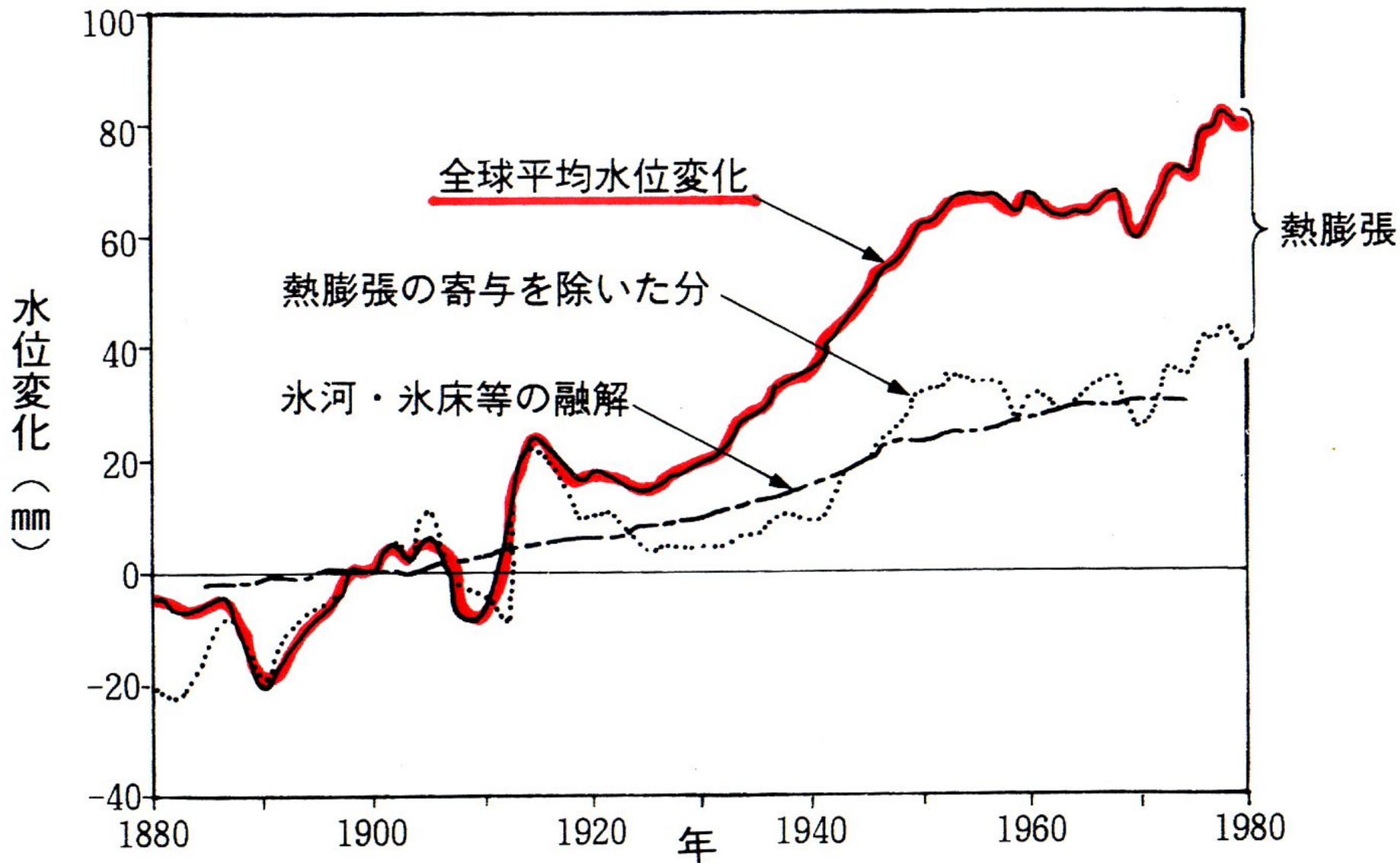


エベレスト山麓の東ロンブク氷河。1921年8月(上)から2008年10月(下)までに、高さ100メートル分の氷河が消えた。

氷河の崩壊(アルゼンチン)



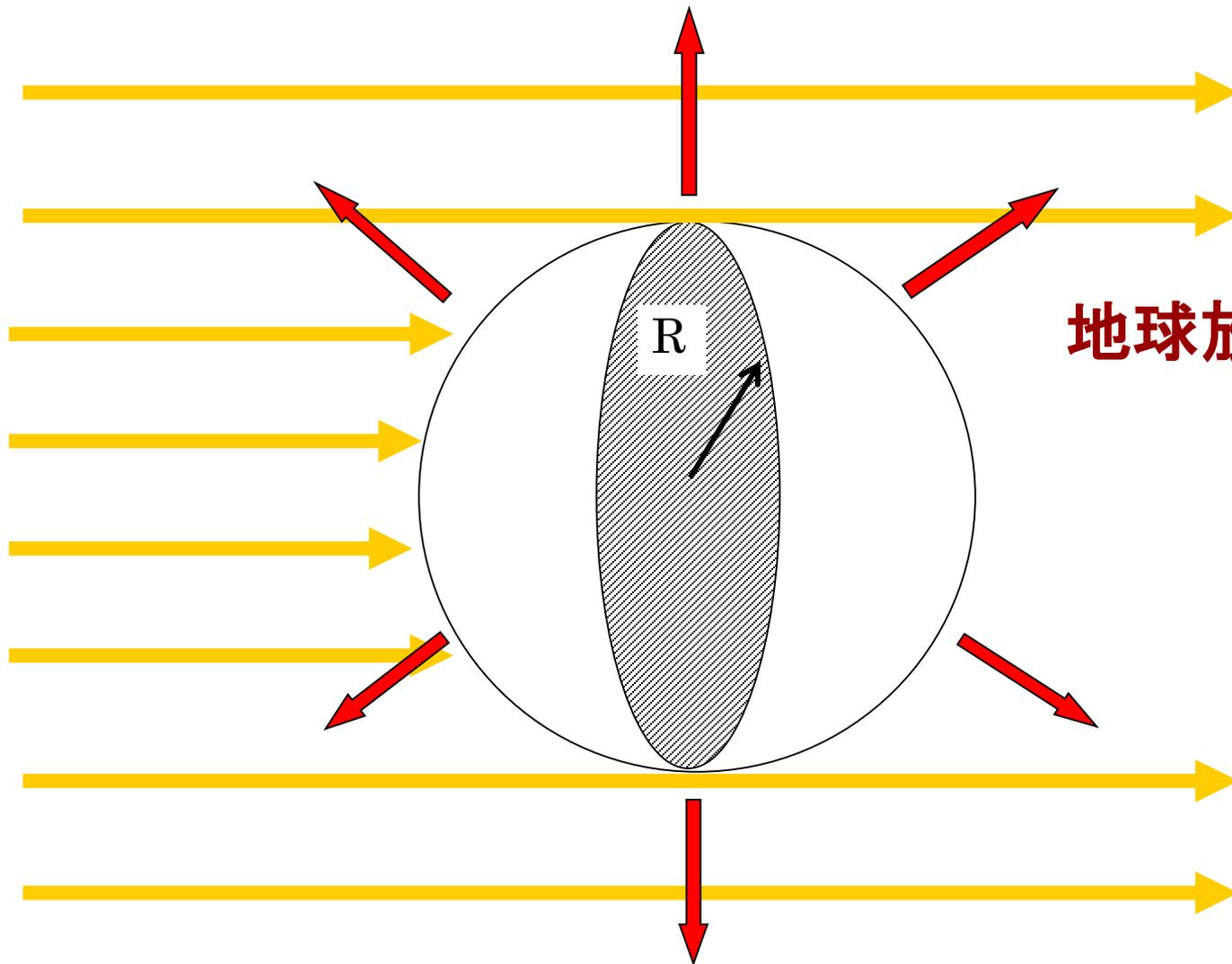
写真提供:2002年元旦アルゼンチンにて 栗林浩撮影



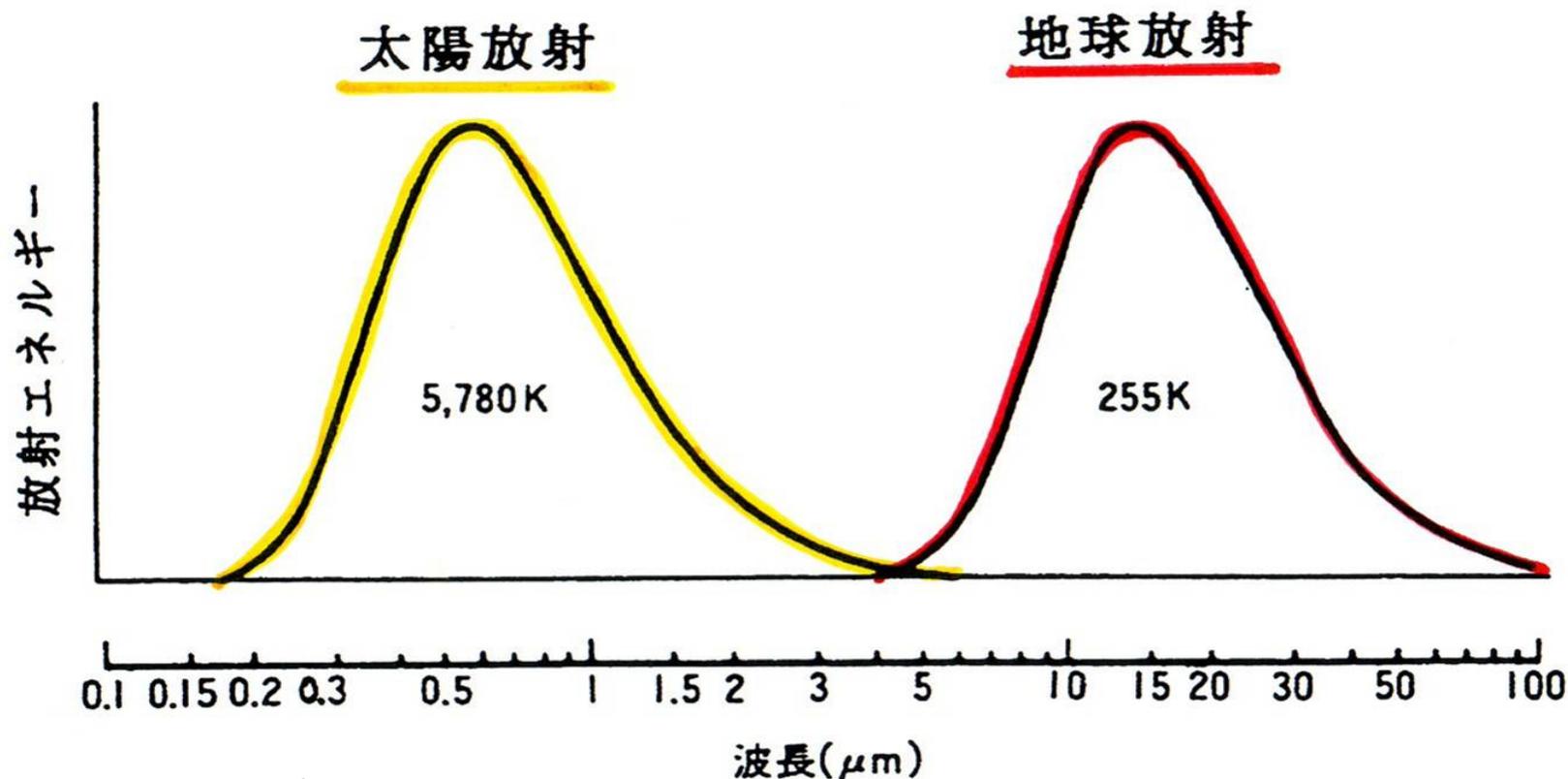
2. 温室効果の原理

- 大気の無い地球表面を考えた場合、地球表面の平均温度は、 -18°C である。
- この大気の無い地球表面上に、ガラスが張ってあるものとする。
- ガラスは太陽放射を透過するが、一方地表からの赤外線は完全に吸収し、温まって、宇宙空間及び地表面に向かって再び赤外線を放射する。これを再放射という。

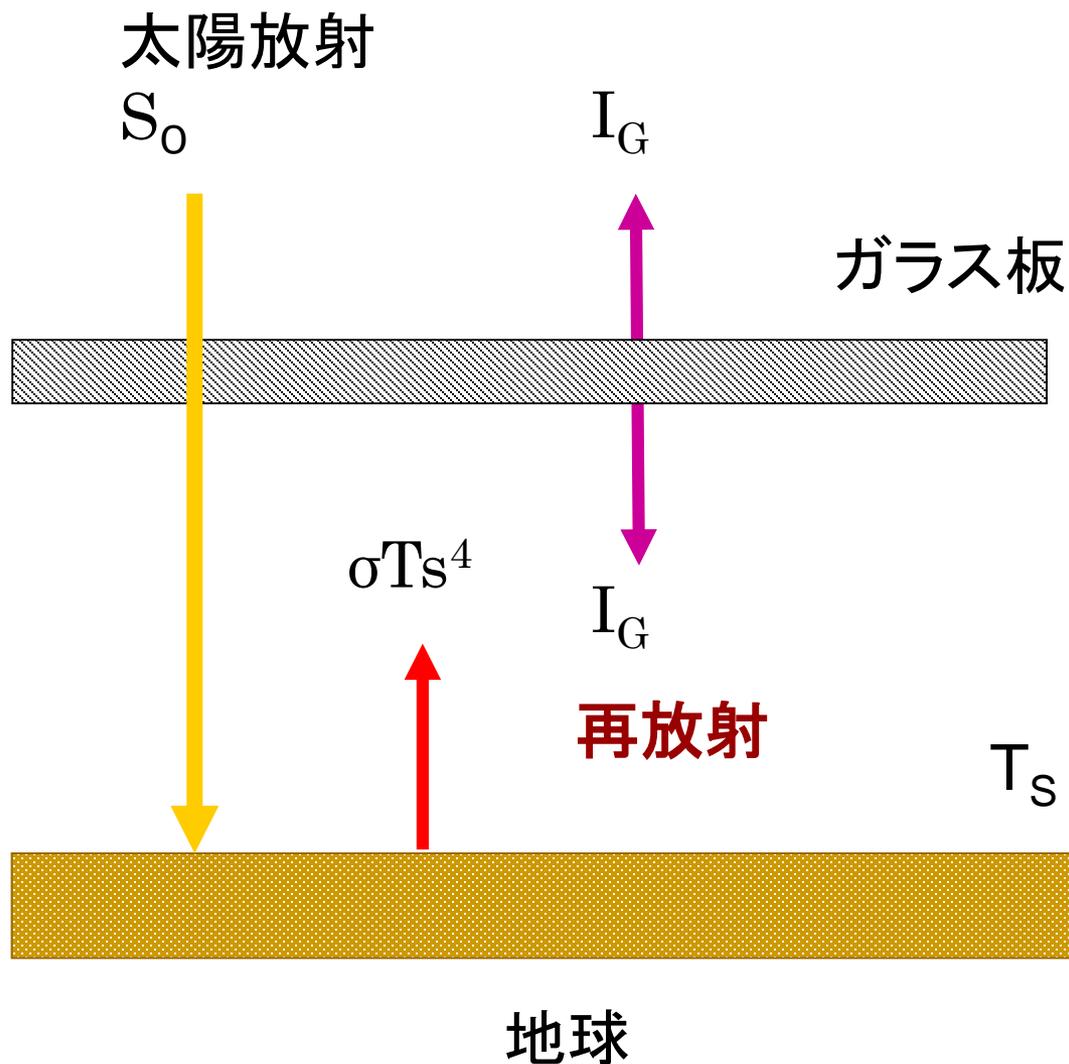
太陽放射



地球放射



太陽放射 (5780K) と、温度 255K の地球が射出する赤外放射 (地球放射) の波長別の放射エネルギー分布曲線。
 ($0^{\circ}\text{C} = 273.15\text{ K}$ 、放射 = 電磁波の流れ のこと)



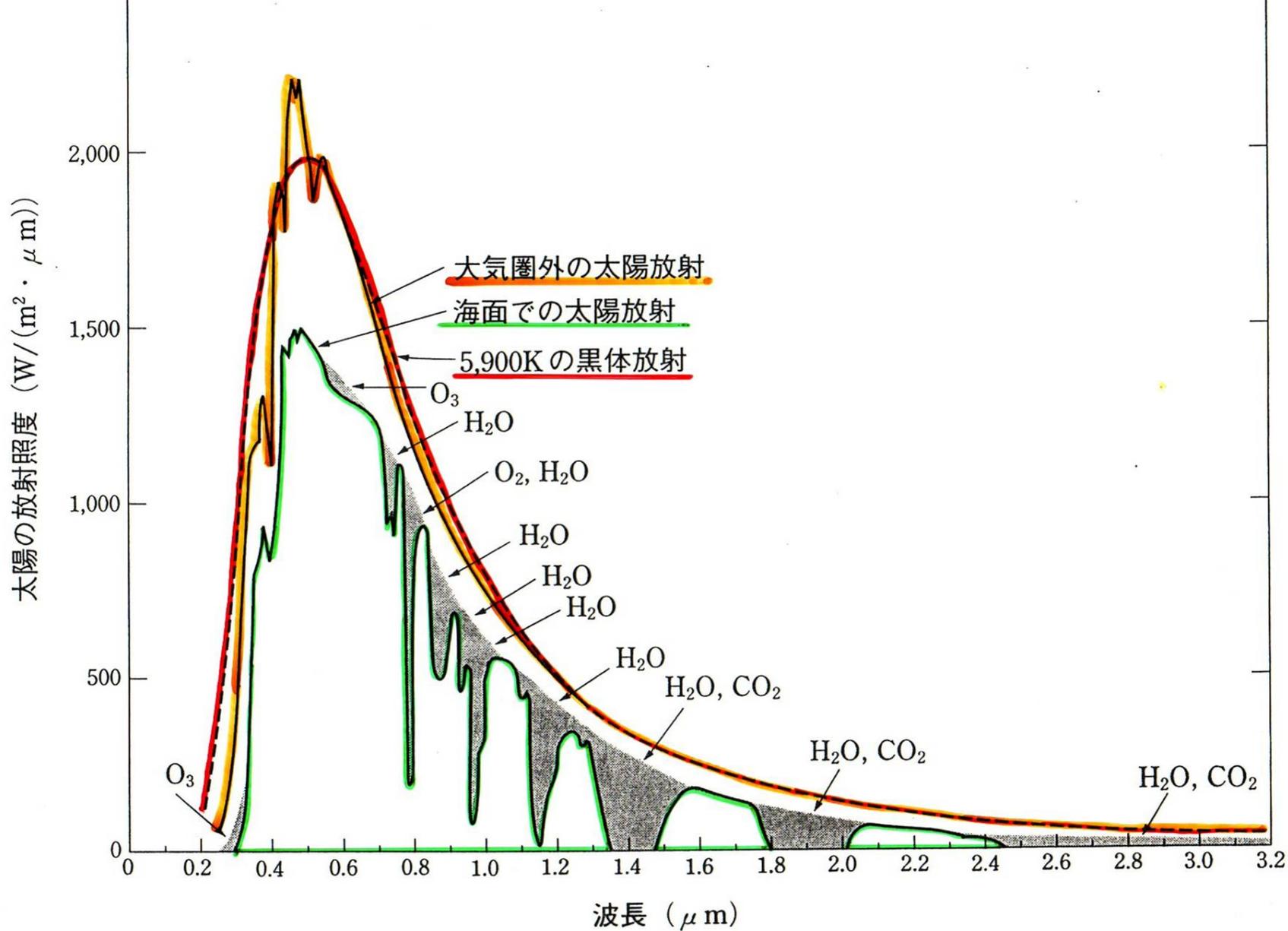
大気のない地球表面上をガラス板で覆った場合の放射収支。 σT_s^4 は温度 T_s (K)の地表面からの赤外放射、 I_G はガラス板からの赤外放射(再放射)

- 地表面は、ガラスのない場合に比べて、この再放射の分だけ余計にエネルギーを得るため、温度が上昇する。

→ 温室効果による気温の上昇

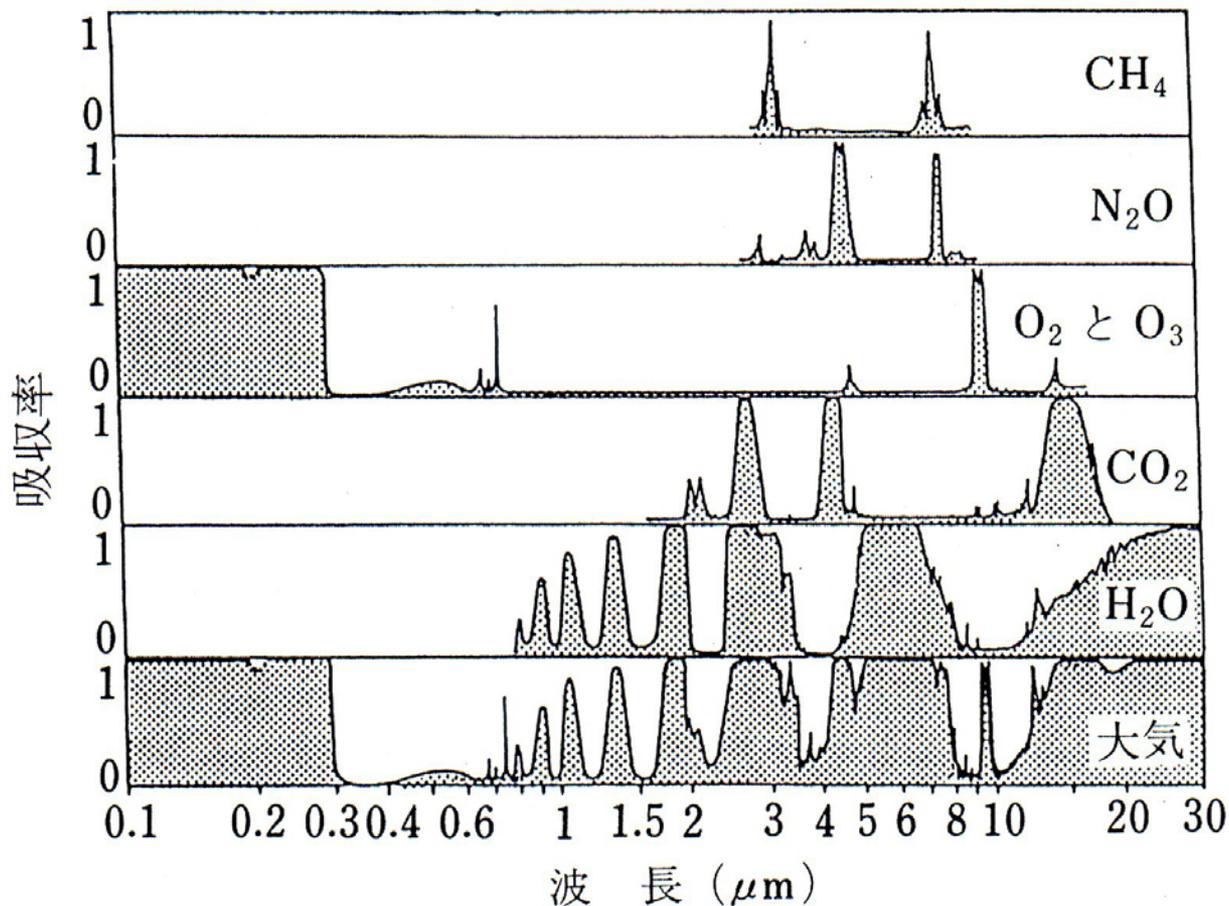
- すなわち、太陽放射は透過させるが、一方、赤外放射は強く吸収する物質が地球表面上に存在する場合、この物質は温室効果を及ぼす。

- 地球大気は、太陽放射領域 (波長 $0.3 \sim 4 \mu\text{m}$) ではほぼ透明であるが、しかし赤外放射領域 (波長 $4 \sim 100 \mu\text{m}$) では透明ではない。
- 水蒸気 (H_2O)、二酸化炭素 (CO_2) およびオゾン (O_3) が、赤外放射を強く吸収する。
- 二酸化炭素及び水蒸気の吸収帯により、地表面からの赤外放射は吸収され、再放射される。
- すなわち、地球大気も温室効果を持っている。



図／大気圏外および海面において、太陽光に垂直な $1 m^2$ の面に注ぐ太陽エネルギー(Valley, 1965)

大気全層の波長別吸収率



主な微量気体成分および大気全層の波長別吸収率 (Fleagle & Businger, 1980 を一部修正)

- この大気の温室効果の結果、地球平均の地表気温は、約288K (15°C)となっている。すなわち大気の無い場合に比べて、33°Cも高温になっている(すでに温室効果を起こしている)。
(0°C = 273.15 K)

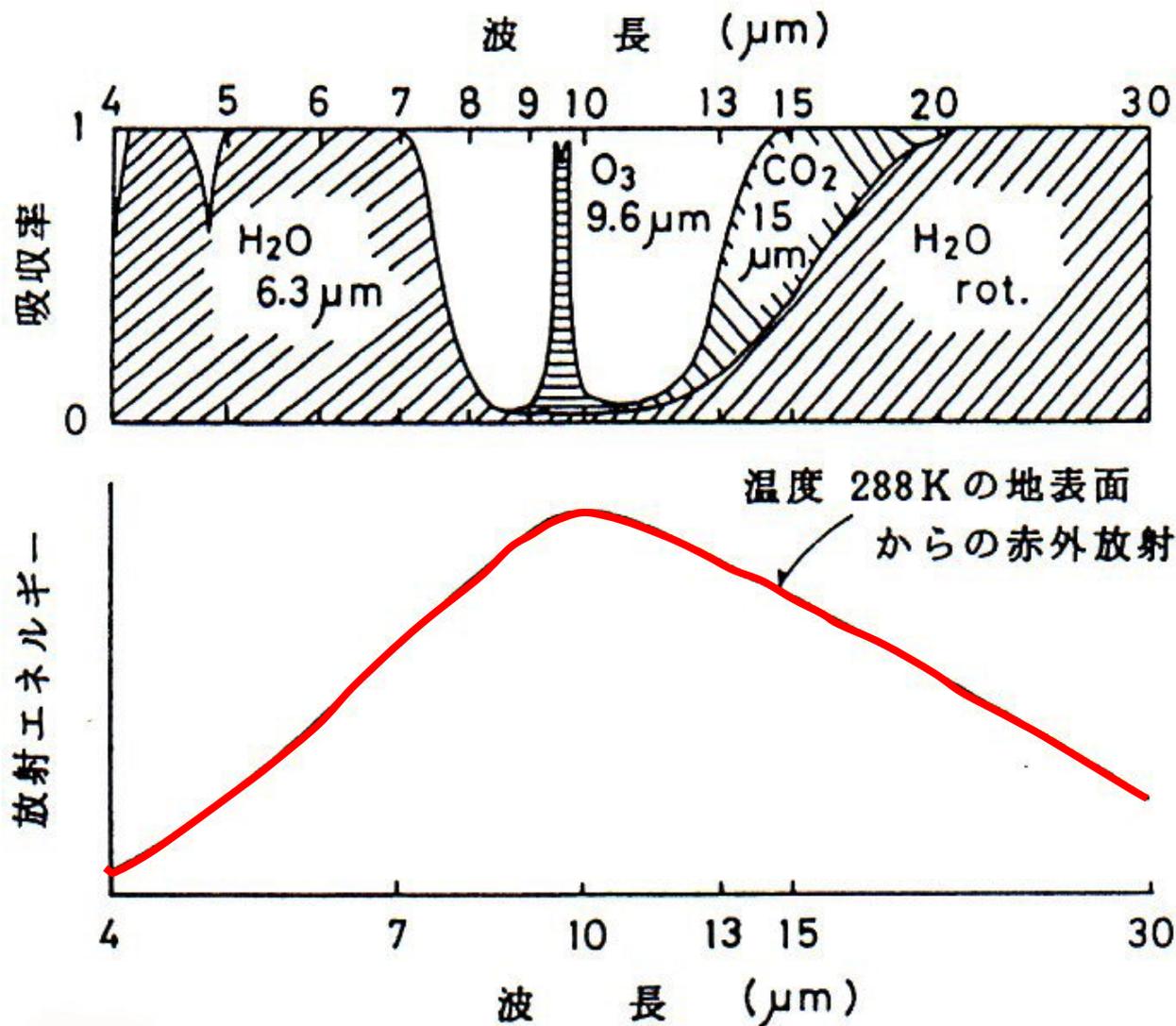
- もしも、二酸化炭素や水蒸気の濃度が増加すれば、これらの吸収帯による吸収が強まり、地表からの赤外放射は、より多く吸収され、従ってまた、より多く再放射されて、温室効果がより強まることになる。

→ 地表気温の上昇

- 種々のフィードバック効果を考慮すると、
二酸化炭素濃度が2倍に増加した場合の
平衡状態での全球平均の地表気温の
上昇量は
→ 3.5 ± 1.0 °C (Manabe 等)
- ただし、高緯度の方が、より昇温が大きい。

3. 大気の窓領域

- 赤外放射領域の7～13 μm の波長範囲では、オゾンの 9.6 μm 帯を除けば、大気はかなり透明である。
- この領域を、大気の窓領域(赤外窓)という。



地球大気の赤外領域での吸収率（上図）と、温度 $288\ \text{K}$ （ 15°C ）の地表面からの赤外放射（下図）

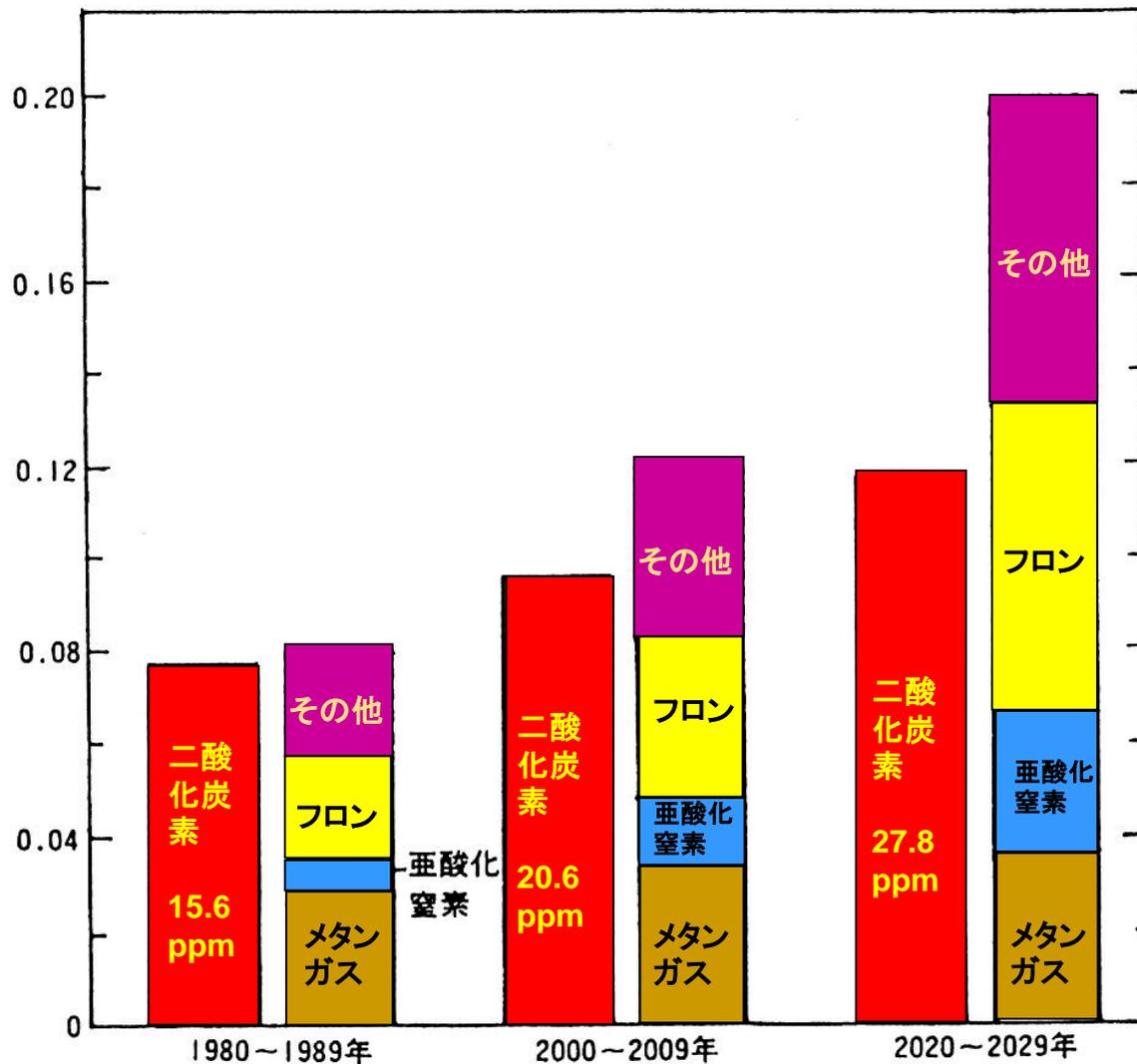
- 二酸化炭素及び水蒸気以外の成分でも、この大気の窓領域に吸収帯を持つものが存在すれば、この大気成分も温室効果を持つ。
- このように、温室効果を持つ気体成分を、二酸化炭素及び水蒸気も含めて、温室効果気体 (Greenhouse Gases)と呼ぶ。

4. 温室効果気体

■ 温室効果気体

- 二酸化炭素 (CO_2)
- 水蒸気 (H_2O)
- フロンガス (CFC11, CFC12, . . .)
- メタン (CH_4)
- 亜酸化窒素 (一酸化二窒素) (N_2O)
- 対流圏オゾン
- 成層圏水蒸気

気温上昇(℃)



各10年間の各種温室効果気体の増加に伴う全球平均の地表気温の上昇量(℃) (ラマナサン等、1987年)

5. 二酸化炭素漸増時の、大循環モデルによる気候変化の予測計算

- 海洋は、熱容量が非常に大きく、この海洋の熱慣性のため、完全に平衡状態になるには数百年もの非常に長い時間がかかる。
(仮に二酸化炭素濃度が突然倍増したとして、20年で、平衡状態の昇温量の約7割の昇温となる)
- また、実際の大気中の二酸化炭素濃度は徐々に増加している。

相当二酸化炭素濃度

- 相当二酸化炭素濃度
(Equivalent CO₂ concentration)

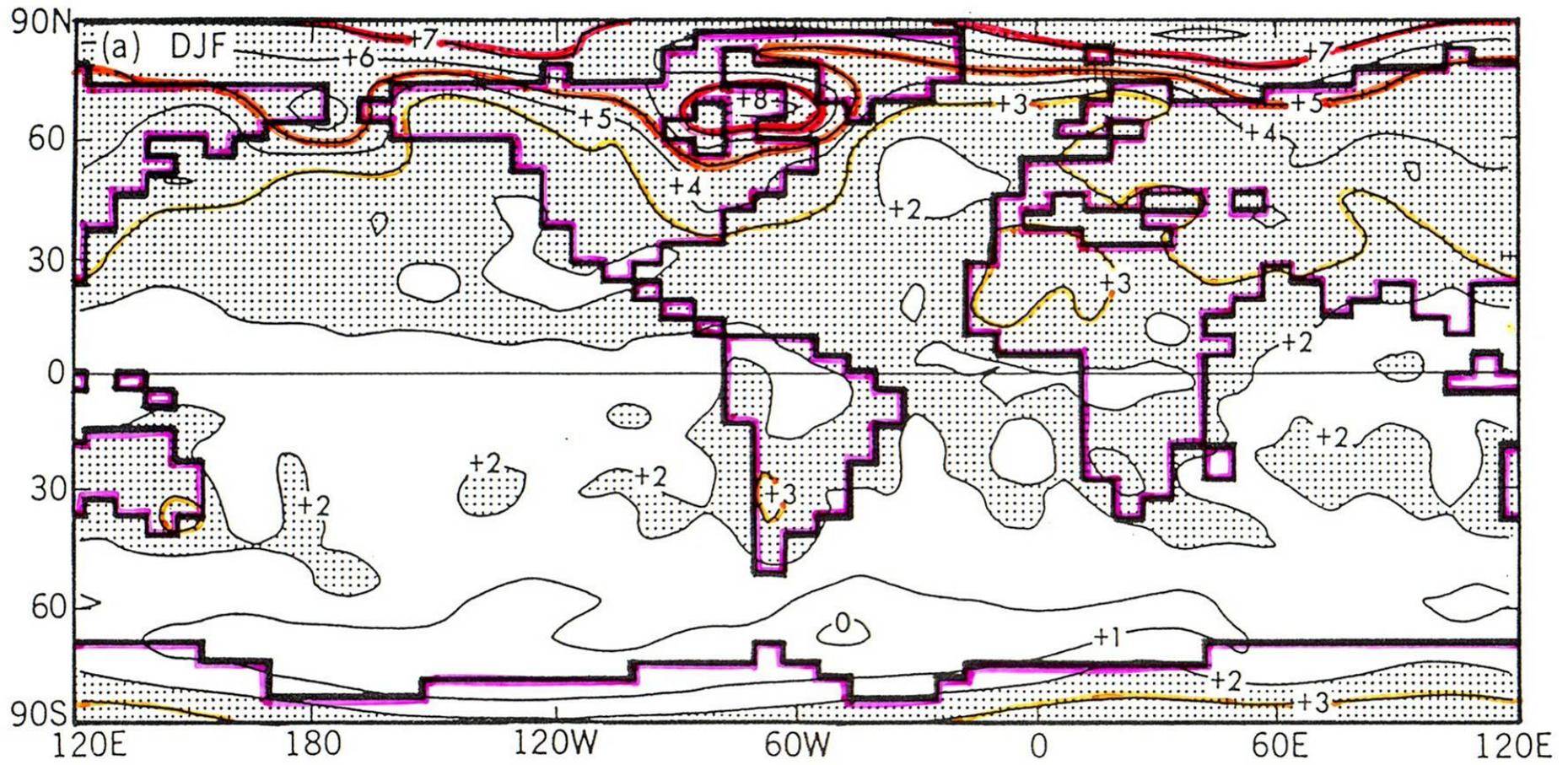
CO₂以外の温室効果気体について、その気体が持つ温室効果と同じ温室効果をもたらすCO₂濃度に置換えて、共存するCO₂濃度に加え合わせたもの

- **相当二酸化炭素濃度は、現在、年に約1%ずつ増加している。**
- **この割合で増加した場合、1958年の二酸化炭素濃度に対して、約70年後の2030年に、相当二酸化炭素濃度は約2倍になる。**

- そこで、大気および海洋の両方の大循環を考慮し、フィードバック効果と、相当二酸化炭素濃度を考慮して、大気中の二酸化炭素濃度が年に1%ずつ増加していく場合の、地表面気温の上昇量についての予測計算が行われた。

(Manabe等、1992)

- その結果、
→ 1958年から約70年後の2030年に、冬季に、北半球高緯度で昇温が大きく、特に北極海周辺で、1958年に比べて5~7℃上昇する。



北極圏の高温化

- 北極圏の気温は、地球平均気温の2～3倍上昇する。
 - ← 北極海は周囲を高山で覆われた地中海であり、Ice albedo（氷床の日射反射率）feedbackにより、高温化がより促進される。
- 一方南極は3000mの厚さの氷におおわれた円形の大陸であり、周囲を南極海流が周回しているため、feedbackが作用しにくい。

水蒸気のフィードバック効果

- 気温の上昇

- 海面からの水蒸気の蒸発量の増加

- 水蒸気の温室効果による気温の上昇

- 水蒸気は最大の温室効果気体である。

6. IPCC第5次報告書 (AR5)による 地球温暖化の予測 (2013年)

- **産業革命期 (1850～1900年)から1986年まで**に、世界の気温はすでに0.61°C上昇している。
- **1951～2010年の間**に、世界の平均の地上気温の観測された上昇量の半分以上は、温室効果気体の濃度増加と人為起源強制力の組み合わせによって引き起こされた可能性が極めて高い (95%以上の可能性)。

* 異常気象が出現しやすくなる。

放射強制力

■ 放射強制力とは :

温室効果気体の濃度変化や太陽放射量の変化などにより引き起こされる、対流圏界面での放射エネルギー収支(太陽放射と地球放射をあわせた全放射エネルギーの収支)のこと。

正の放射強制力: 地表を加熱する

負の放射強制力: 地表を冷却する

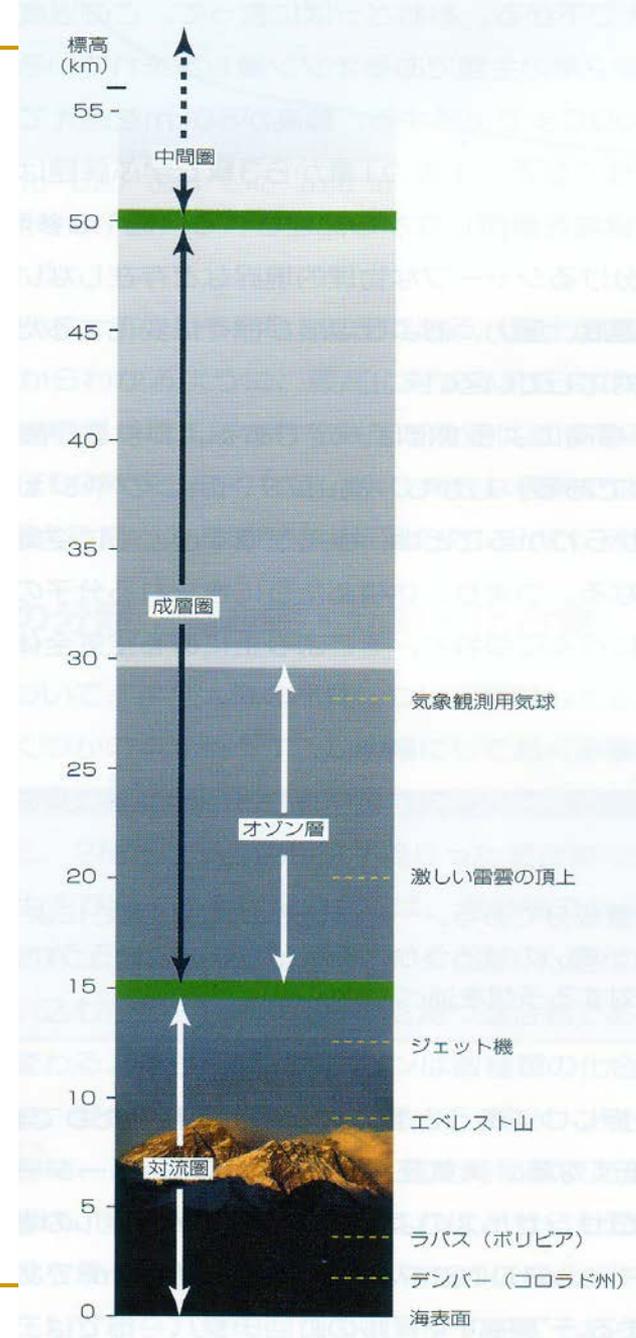
標高と大気の領域

成層圏(15~50km)

対流圏界面(~15km)

対流圏(0~15km)

地表

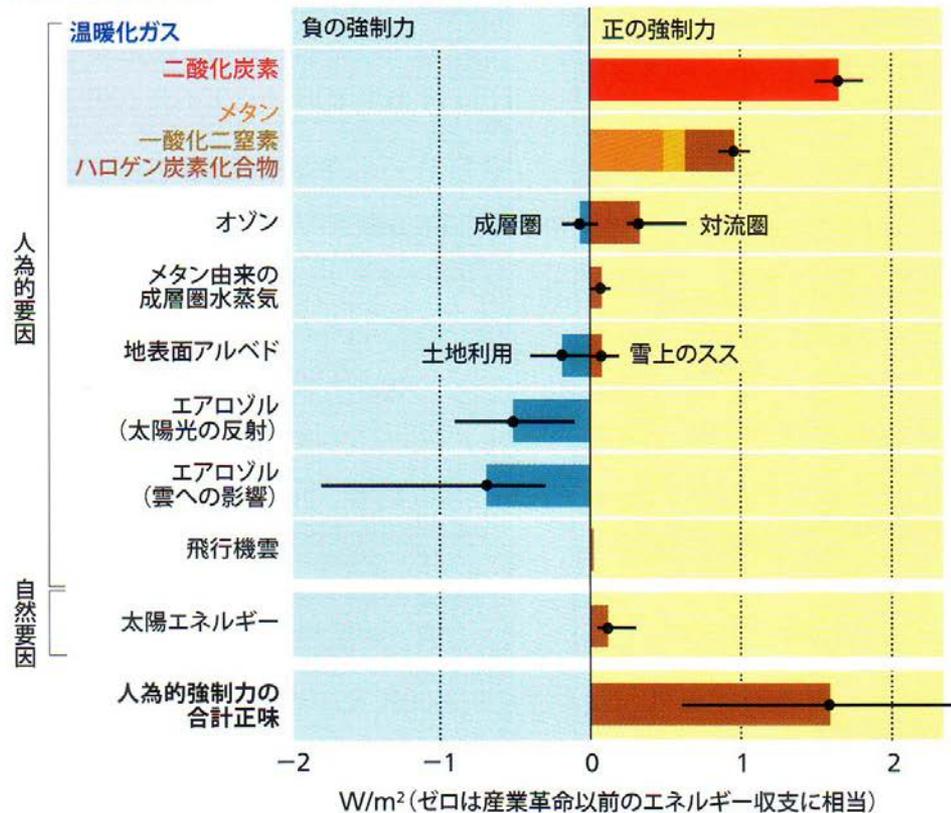


気候に影響を与える要因

正の強制力（気候を産業革命以前の水準よりも温暖化の方向に引っ張る影響力）と負の強制力（寒冷化に向かわせる影響力）との綱引きは、主に人間活動がもたらした要因が温暖化に働く

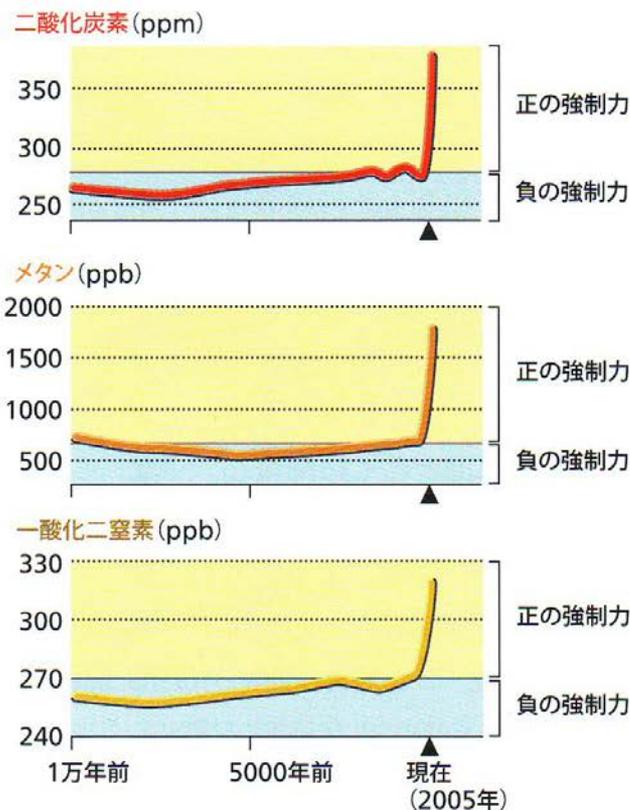
ことで、正の強制力の“楽勝”となる（左グラフ）。人間活動がもたらす放射強制力のうち最大のものは長寿命温暖化ガスで、その大気中濃度は過去200年ほどの間に急増した（右グラフ）。

放射強制力——綱引き勝負は一方向的



主要な要因について、放射強制力の2005年時点の推計値（全地球平均）を示す。黒い線はエラーバーで、確実さの程度を表す。値がエラーバーの範囲に収まる確率は90%だ。温暖化ガスに関する値はとても確実だが、エアロゾルの効果にはかなりの不確実性が伴う（なお、火山が排出するエアロゾルは、噴火がたまにしか起こらないため、グラフには含めていない）。

温暖化ガス——最大の影響要因



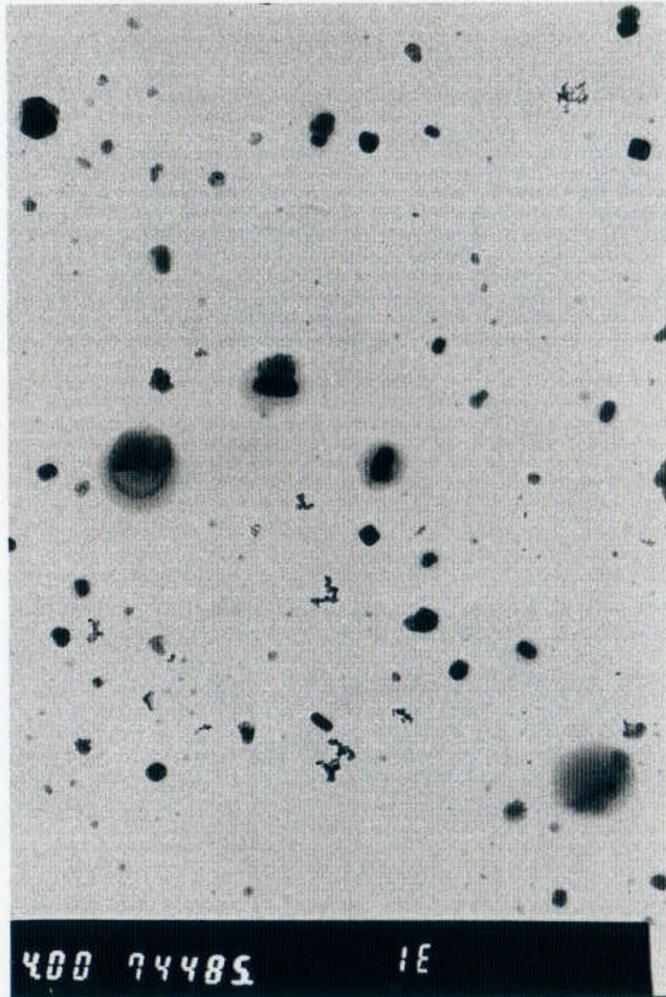
二酸化炭素とメタン、一酸化二窒素の大気中濃度を示す。過去の値は氷床コアの試料から、最近の値は大気サンプルから得た。近年の急増は大部分が人間活動の結果と考えられる。

大気エアロゾルとは？

- 大気中に浮遊している**微粒子**である。
- 粒径は**0.003 ~ 30 μ m**にわたっている。
- **多成分の粒子**の集合体である。
煤粒子、有機物粒子、硫酸粒子、硫酸塩粒子、
硝酸塩粒子、海塩粒子、土壌粒子、重金属粒子
・・・などから成る。
- 寿命(大気中の存在時間)は**1週間程度**である。

写真1:

長崎県五島列島福江島（左）と札幌（右）で採取された大気エアロゾルの顕微鏡写真。福江島の写真中の最も大きなエアロゾルの直径が約1ミクロンである。黒い繊維状（糸くず状）に見えるものが煤粒子、円形（球状）のものは硫酸粒子、有機物粒子あるいは金属粒子、ほぼ四角形（立方体）の粒子は海塩粒子と思われる。



大気エアロゾルの気候影響

- **直接効果**：太陽放射の散乱・吸収過程を変化させ、地球の熱収支を変化させる。
 - 透明なエアロゾル：太陽放射を散乱する
 - 地球の寒冷化（負の放射強制力）
 - 着色性のエアロゾル：太陽放射を吸収する
 - 地球の温暖化（正の放射強制力）
- **間接効果**：雲の太陽放射反射率を変えることにより、気候に影響を与える。
 - 小粒径の雲粒が増加することにより、雲の反射率が増加する（負の放射強制力）

雲粒の形成

- 大気中の水滴は、水溶性の粒子（海塩核や硫酸アンモニウム粒子等）を核として、相対湿度が100.5%程度、すなわち過飽和度が0.5%程度で、水蒸気が凝結し形成される。
- 凝結して水滴となることのできる、ある水蒸気量に対して、水溶性の粒子が少ないときには小数の大きな水滴（雲粒）による雲が形成されるが(A)、水溶性粒子が非常に多い場合には、多数の小さな雲粒による雲が形成される(B)。
- AよりもBの雲の方が、よりキラキラ輝く（太陽放射をよく反射する）。
→ 反射率の高い雲ができ、地表気温をより低下させる。

気候モデルによる予測の不確実性

- 特にエアロゾルと雲の取り扱いにおける不確実性が大きい。
- エアロゾルの直接効果における不確実性
： エアロゾルの総量と粒径分布、及び透明なエアロゾルと着色性エアロゾルの存在割合 (散乱・吸収特性)
を把握しなければならない。
- エアロゾルの間接効果による雲の放射強制力の
大きな不確実性 : $-0.5 \sim -1.5 \text{ W/m}^2$

北極海の 海水の減少



北半球の 気候変動を 引き起こす。

1979



2005



下は、2007年夏の終わりに衛星で観測した北極海の海水。1970年代後半（左上）に観測を始めて以来、最小面積を記録した。この夏は温暖な南風や雲の量の少なさなど複数の要因が作用して、それまでの最小記録だった2005年（右上）よりも130万平方キロ近く氷が縮小した。

近年の北極地域の温暖化傾向を基準にしても、2007年は確

かに異常に暖かい年だった。だが、今後はさらにこれを上回る年が出てくるだろう。

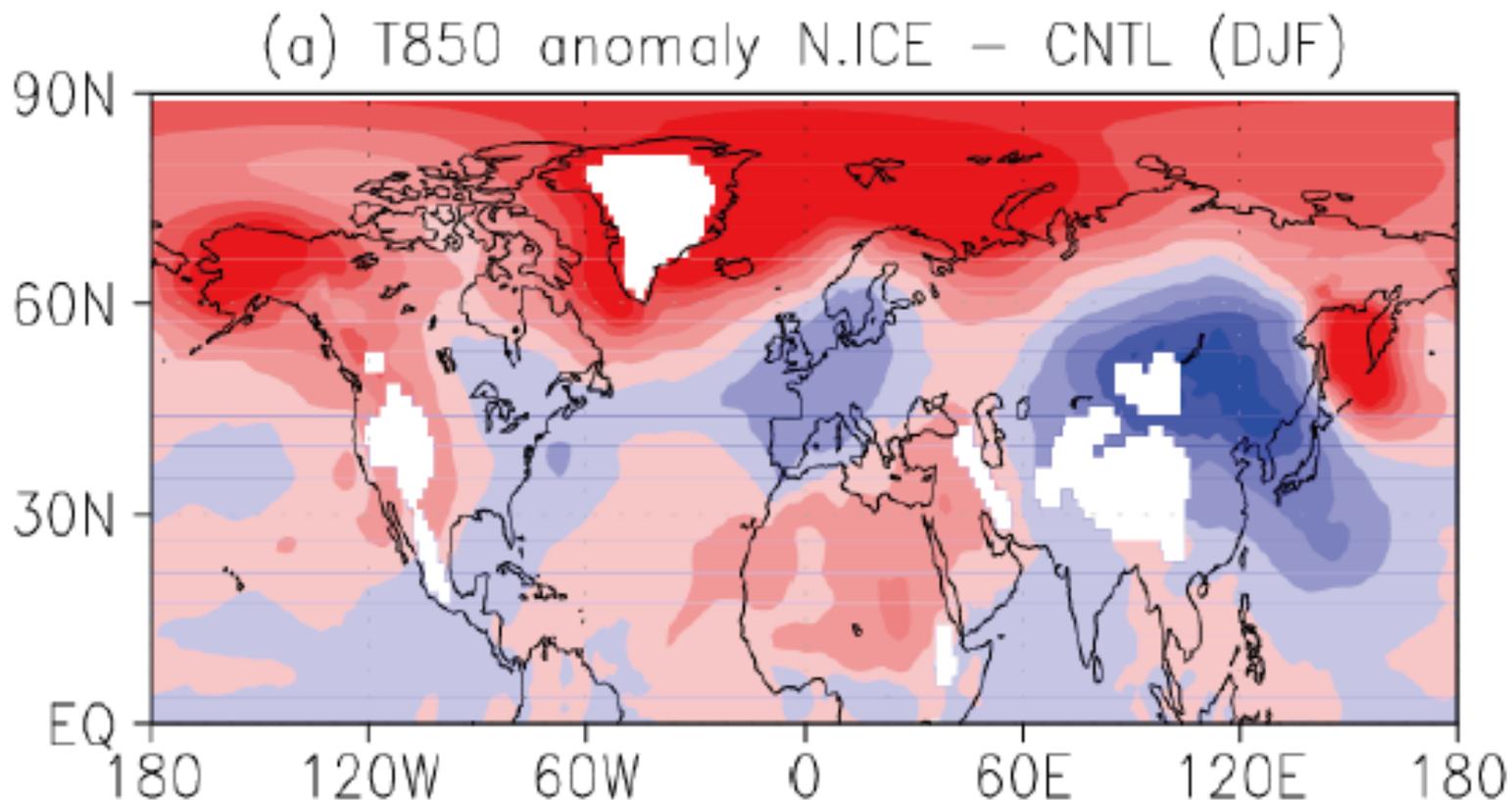
米国雪氷データセンターの予測によると、夏の北極海の氷は、2030年までにはなくなりそうだ。そうなれば昔の航路が再び開通し、各国は新たに開かれる水域の権利をわれ先に主張することになるだろう。

2007



北極海の海氷の減少が日本に及ぼす影響

: 冬季の日本の寒冷化→北日本の低温、暴風雪



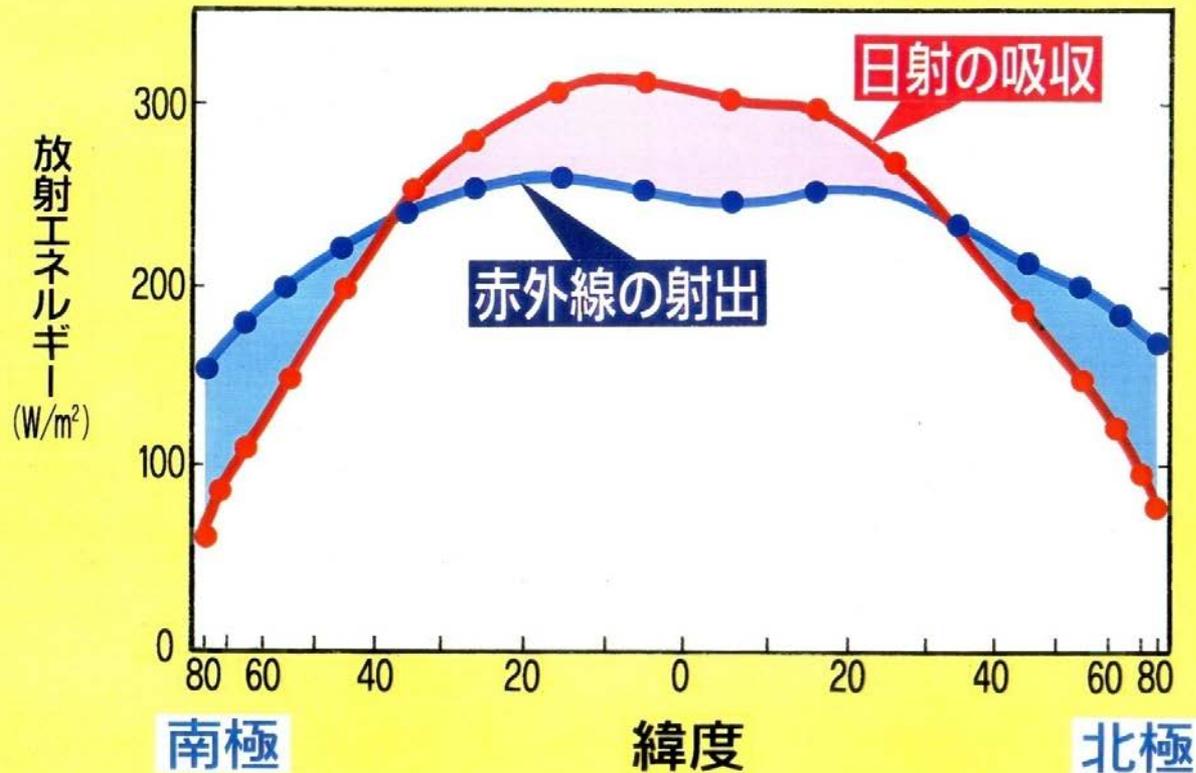
冬季の日本の寒冷化の機構

- 北極海の海氷が開くことにより、海からの熱が大気を温め、大気の大循環を変え、北極を回る大気の蛇行が大きくなり、北極側の冷たい空気が中緯度に流れ下り、寒冷化を引き起こす。
- ジェット気流(偏西風)の蛇行に伴い、気圧場の東進を抑えるブロッキング現象が起こり、冬季の北日本側に低気圧が停滞して低温、暴風雪が続く。

大気の大循環

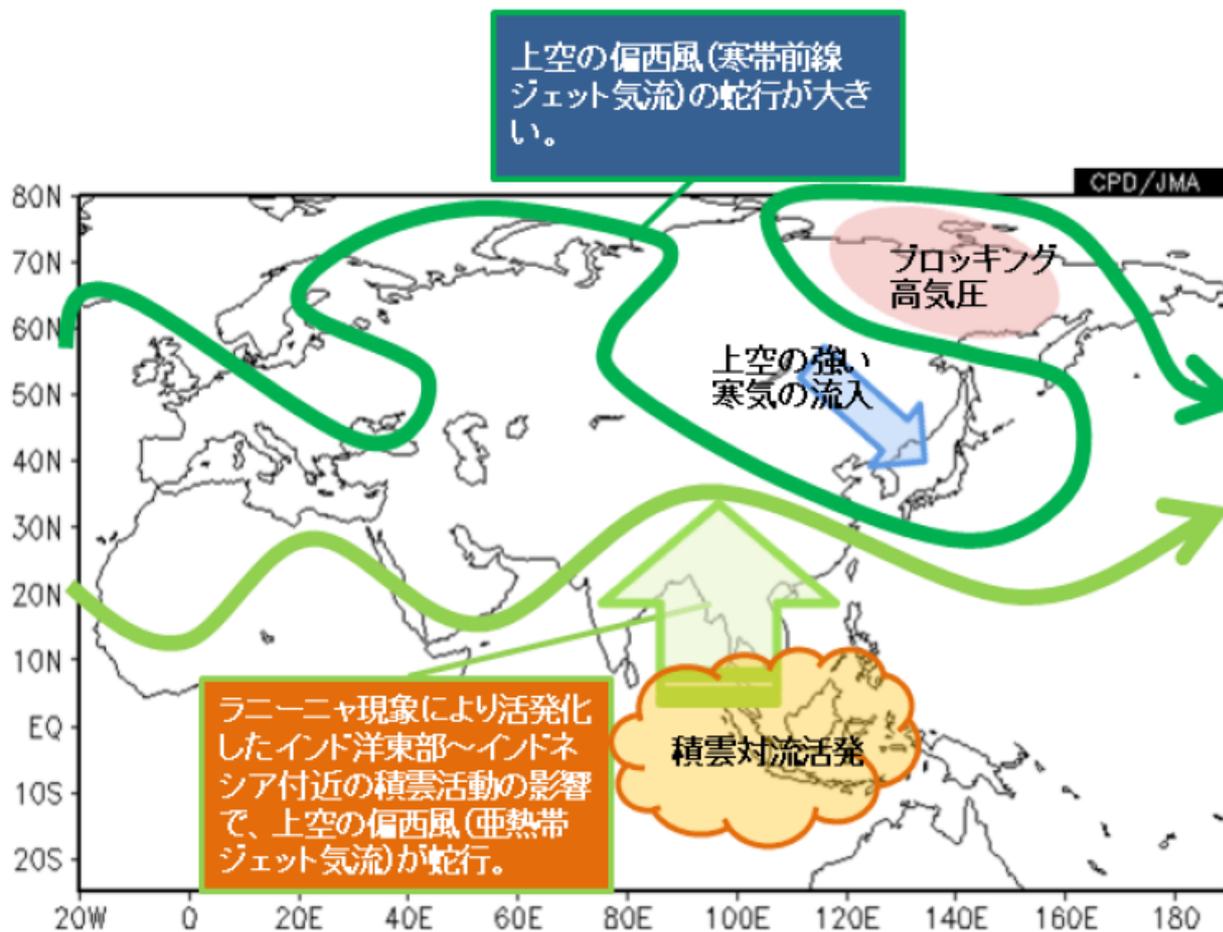


地球の放射収支



偏西風の蛇行とブロッキング

平成 24 年 1 月下旬～2 月初め

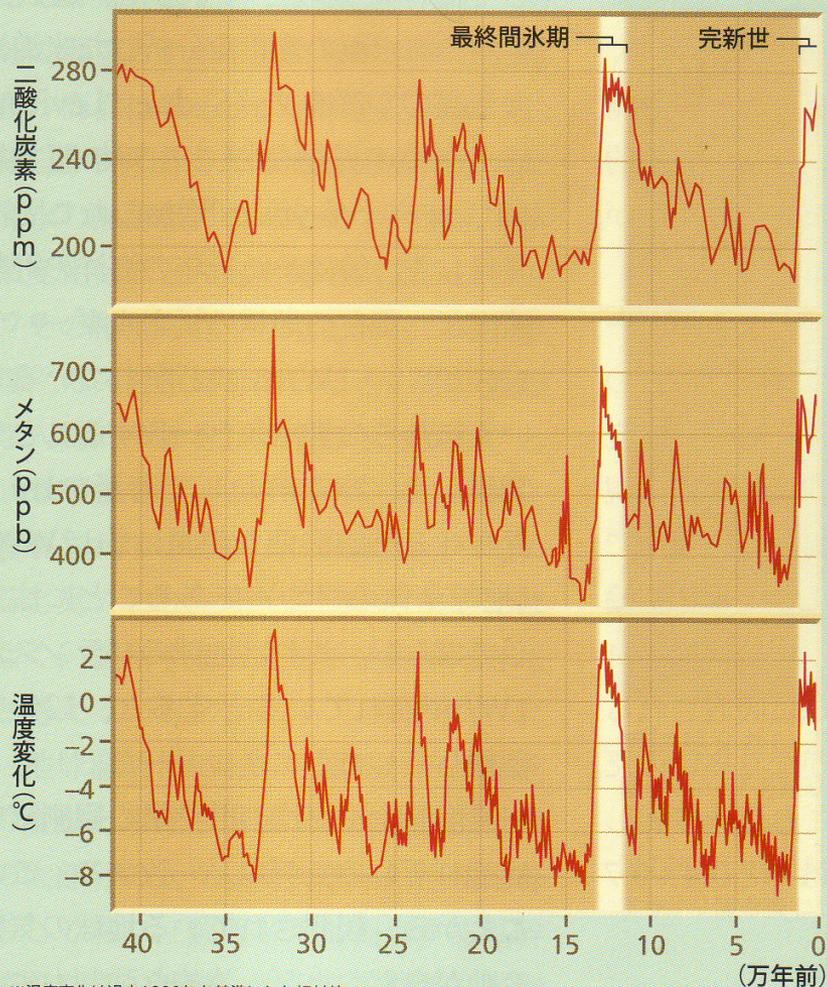


* 氷河期への移行が近いのでは？

- 過去40万年の間、約10万年ごとに氷河期と間氷期が繰り返されてきた。
 - 太陽を回る地球の公転軌道の変動（楕円軌道の離心率、軌道傾斜角、、、等の変動）に起因する：
ミランコビッチの仮説
- 間氷期は、2万年程度しか続いていない。
- 今後、数千年以内に、また氷河期に移行するのではないか？
- その時、100億人を超える人類は、エネルギーと食糧をどう確保するのか？

過去40万年の気候変動

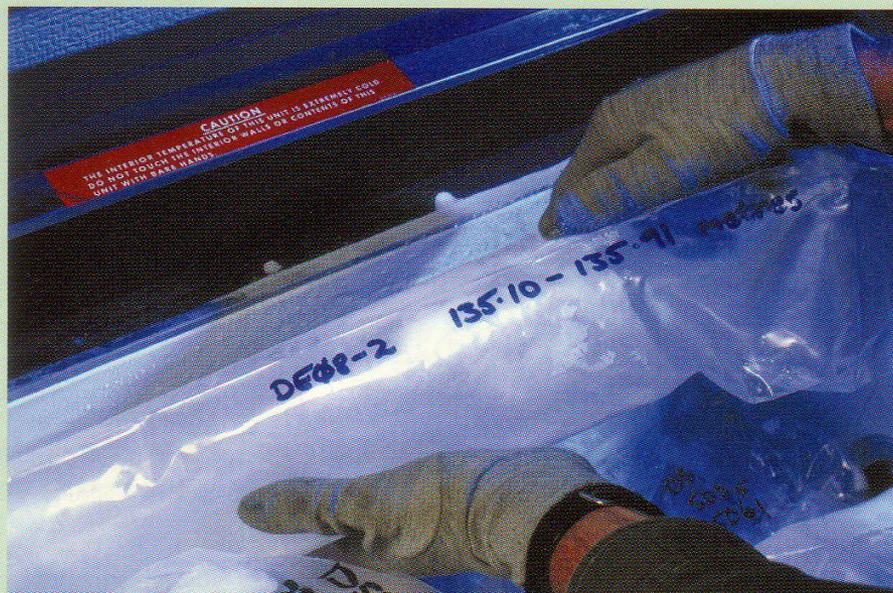
過去40万年の気候変動



※温度変化は過去1000年を基準にした相対値

南極の氷には気温や大気中の二酸化炭素濃度、メタン濃度などの40万年分の記録が保存されている。通常は氷床から採取した氷コア(写真)を研究室に輸送し、氷の中に閉じこめられた気泡中のガスを調査する。

古気候のデータから2つの重要な尺度が得られる。まず、現在の間氷期(完新世)と最近の氷河期(2万年前)を比較することで、強制力に対する気候感度の変化を正確に評価できる。また、前の間氷期(最終間氷期)には海面が現在よりも数m上昇した。この時の気温から、気候に対する危険な人為的干渉だと(現代の文明において)判断されるような地球温暖化の推定値を決定できる。



過去15万年間の気候変動(氷河期と間氷期)

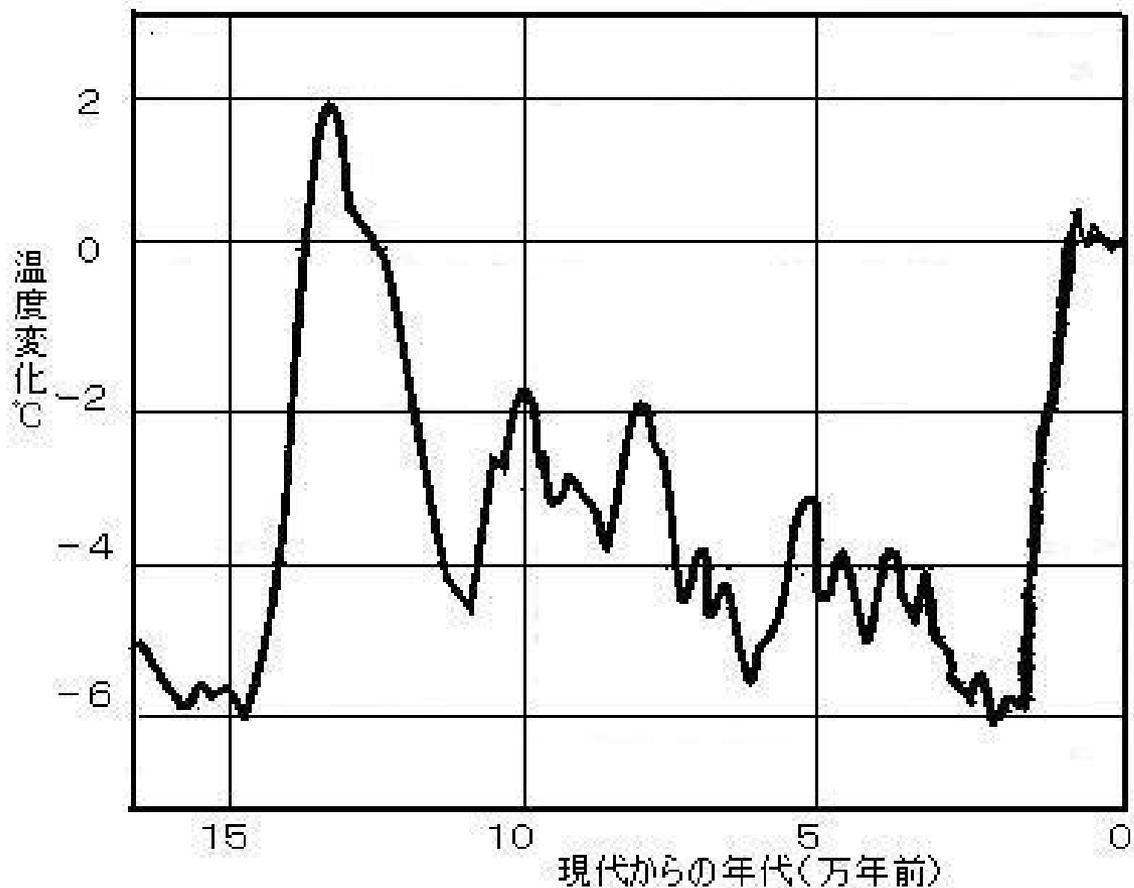
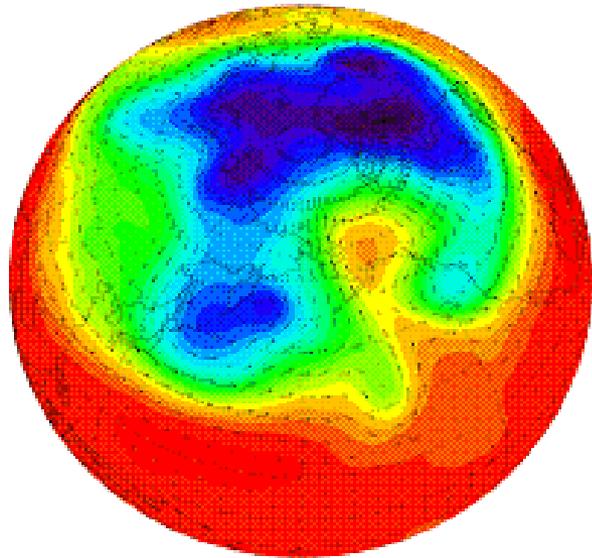


図3 南極ボストーク氷床コアから得られた気温の記録

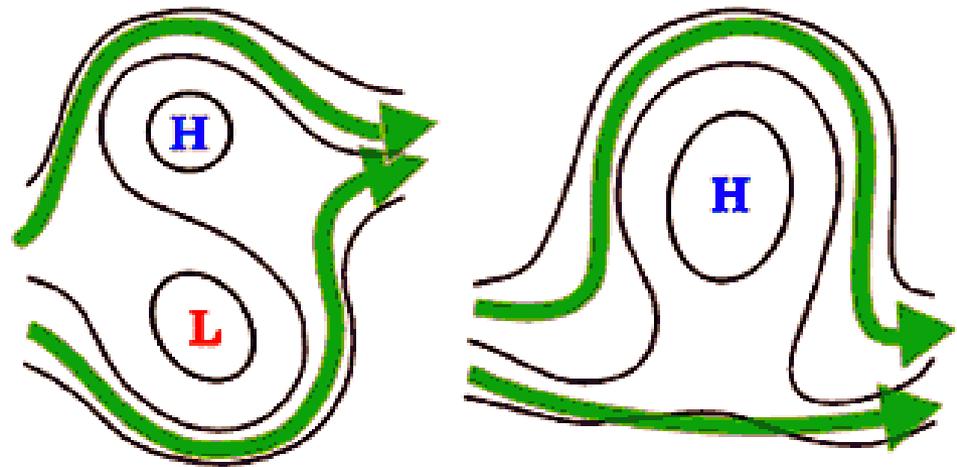
ブロッキング現象

- 通常、高気圧や低気圧は、4~6週間の変動周期を持った偏西風の波動（波長約1万km）により、西から東に移動してくる（気圧場の東進）。
- しかしこの偏西風波動が通常よりも大きく蛇行する場合、高・低気圧が移動のルートから切り離されて、独立した大きな高気圧（ブロッキング高気圧）や大きな低気圧（寒冷低気圧）となって、長く同じ場所に居座り、停滞してしまう。これをブロッキング現象とよぶ。
 - 長雨、豪雨、寒波などの異常気象の出現

偏西風の蛇行とブロッキング



偏西風の蛇行により寒気が南下



ブロッキングのパターン 双極型(左)とΩ型(右)
緑の矢印は、偏西風のジェット気流を示す

(出典: Jacso Palace)