

地球温暖化の化学

1. 太陽放射

- ①黒体放射とプランクの法則
- ②太陽放射強度と距離
- ③太陽放射と太陽定数
- ④太陽定数の算出



黒体放射とプランクの法則

➤黒体

すべての電磁波を吸収し、放射する物体

➤プランクの法則:

黒体放射を記述する法則

$$E(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left(\exp\left(\frac{hc}{kT\lambda}\right) - 1 \right)}$$

$E(\lambda)$: 波長 λ (m)におけるエネルギー
(W m^{-3})

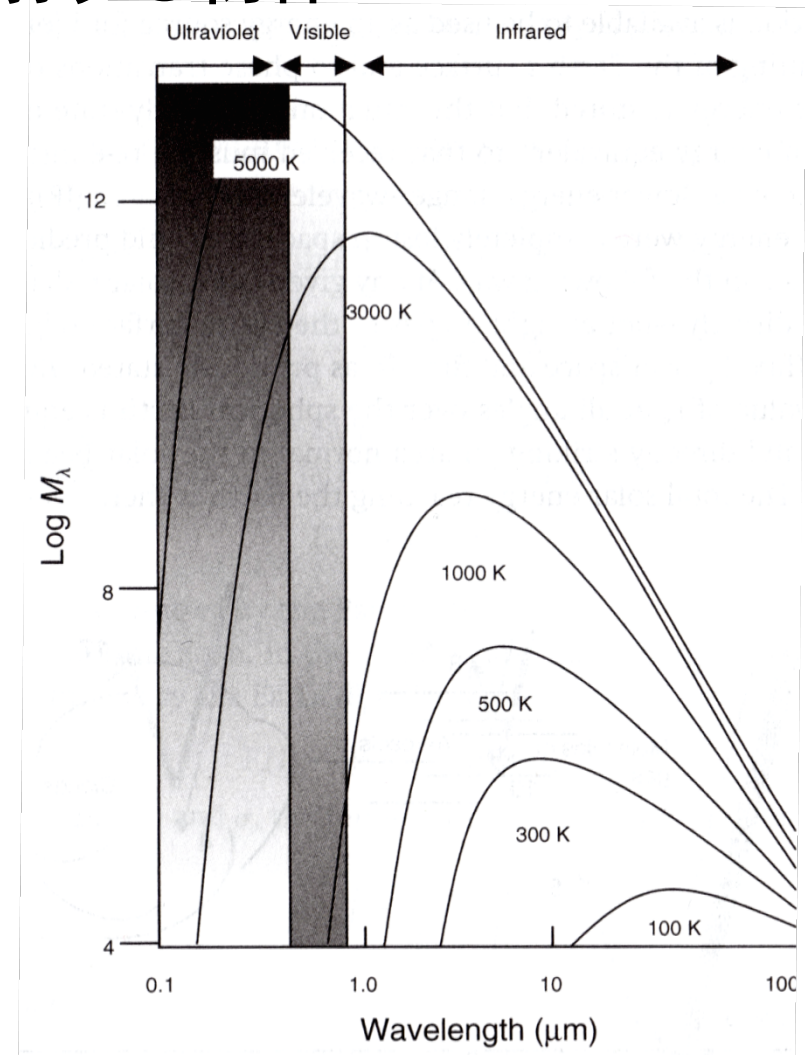
h : プランク定数

$$= 6.63 \times 10^{-34} \text{ J s molecule}^{-1}$$

c : 光速 $= 3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$

k : ボルツマン定数

$$= 1.38 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$$





黒体放射とプランクの法則

➤ ウィーンの変位則

温度：上昇 ➡ 最大波長：増加

$$\lambda_{\max} = \frac{2897}{T} \quad (\mu m)$$

$\lambda_{\max}$ ：最大波長
T：温度

➤ ステファン・ボルツマンの法則

温度：上昇 ➡ 放射強度：増加

曲線と横軸で
囲まれた面積

$$E_{\text{total}} = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} T^4 = 5.67 \times 10^{-8} T^4 = \sigma T^4 \quad (W \, m^{-2})$$

σ ：ステファン・ボルツマン定数
 $= 5.67 \times 10^{-8} \, W \, m^{-2} \, K^{-4}$



太陽放射強度 vs. 距離

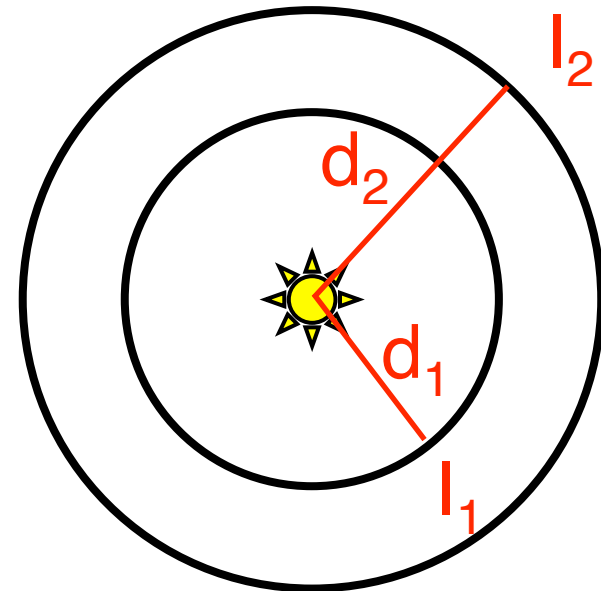
太陽を中心に半径が d_1 , d_2 の球面を考え, それぞれの球面状の放射強度を I_1 , I_2 とする.

仮定: 太陽と球面までの空間で, 散乱と吸収を無視

$$I_1(4\pi d_1^2) = I_2(4\pi d_2^2)$$

$$\therefore \frac{I_1}{I_2} = \frac{d_2^2}{d_1^2}$$

$$I \propto \frac{1}{d^2}$$



放射強度 ➡ 距離の二乗 に逆比例



太陽放射と太陽定数

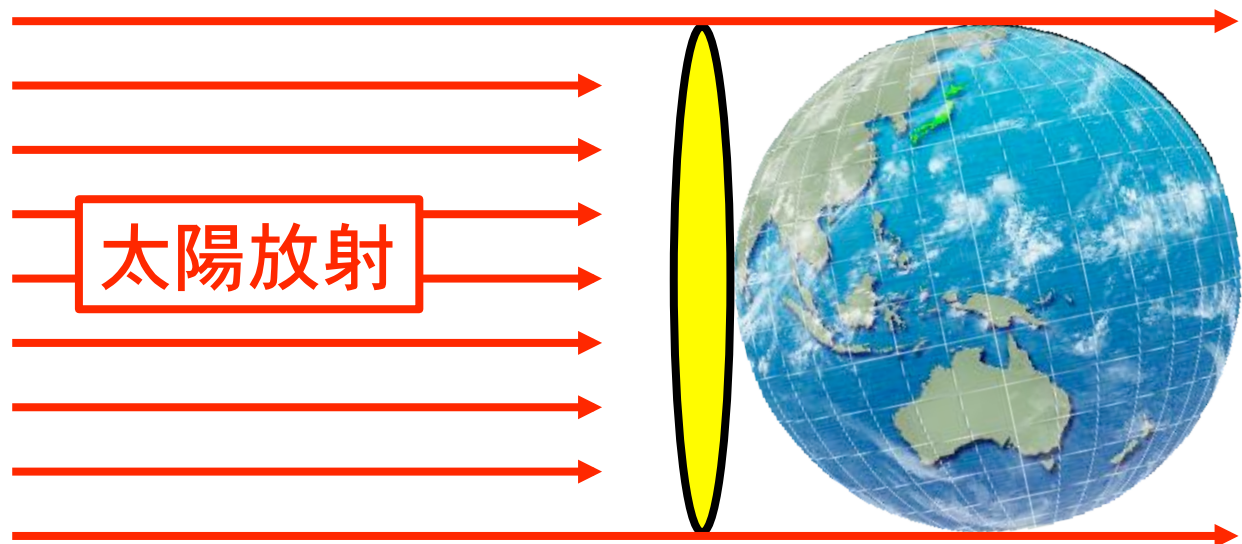
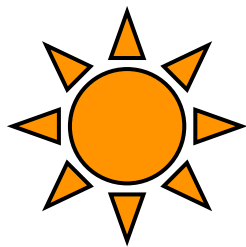
➤ **太陽放射**: 地球大気の衛星軌道が受け取るエネルギー

➡ 地球大気の運動のエネルギー源

➤ **太陽定数(solar constant)**

地球大気上端で, 太陽放射に直角な単位面積が単位時間に受ける太陽の放射エネルギーの平均値

$$S_0 = 1.37 \times 10^3 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ (} 1.37 \times 10^3 \text{ W m}^{-2} \text{)}$$





太陽定数の算出

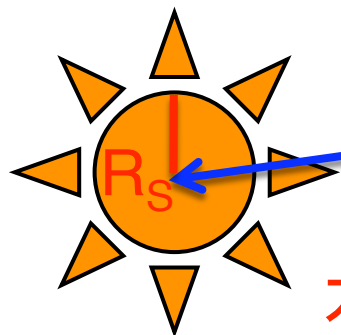
単位時間に太陽 ($T_s = 5780 \text{ K}$) から放出される全放射

$$E_s = (4\pi R_s^2) \sigma T_s^4 \text{ (W)} \quad \text{単位: } W = J s^{-1}$$

太陽を中心とした半径dの球面上での太陽放射フラックス

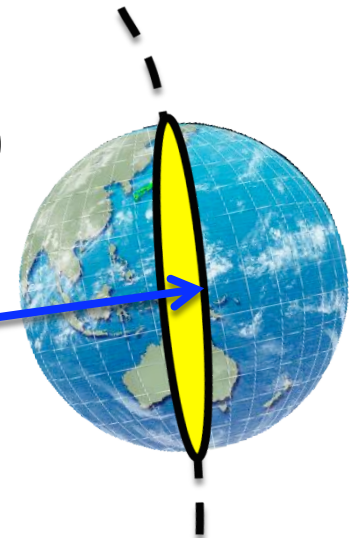
$$F_s = \frac{E_s}{4\pi d^2} \text{ (W m}^{-2}\text{)} = \sigma T_s^4 \left(\frac{R_s}{d} \right)^2 \text{ (W m}^{-2}\text{)}$$

太陽の半径 $R_s = 7 \times 10^5 \text{ km}$, 太陽と地球の距離 $d = 1.5 \times 10^8 \text{ km}$ として $F_s = 1370 \text{ W m}^{-2}$ ($= S_0$) となることを確認せよ.



σT_s^4
太陽放射

d



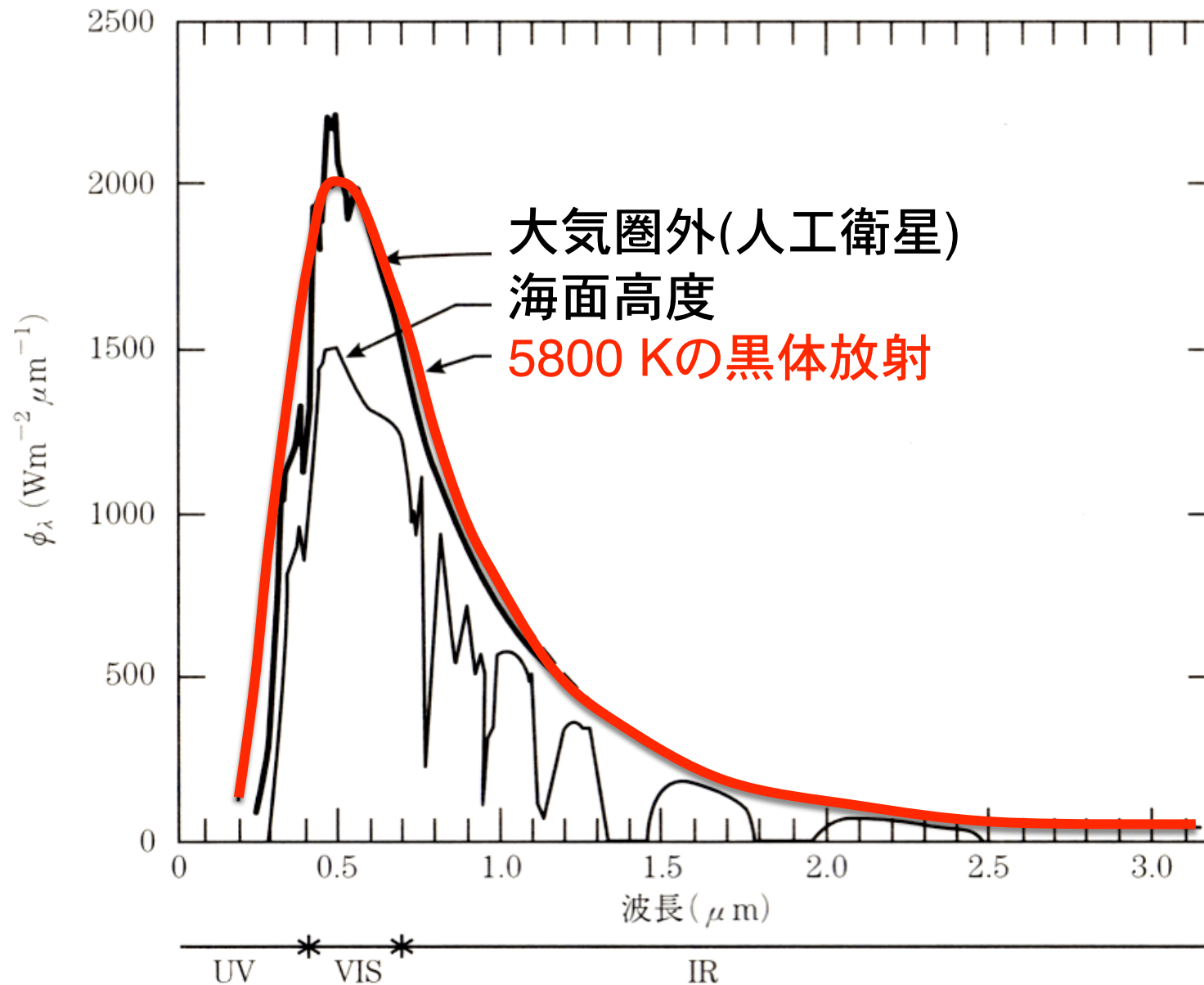
太陽を中心として半径dの球面上

2. 太陽放射の吸収と反射

- ①太陽放射スペクトル
- ②地球放射スペクトル
- ③太陽放射と地球放射の吸収率
- ④地球表層における太陽放射の反射と吸収
- ⑤アルベド

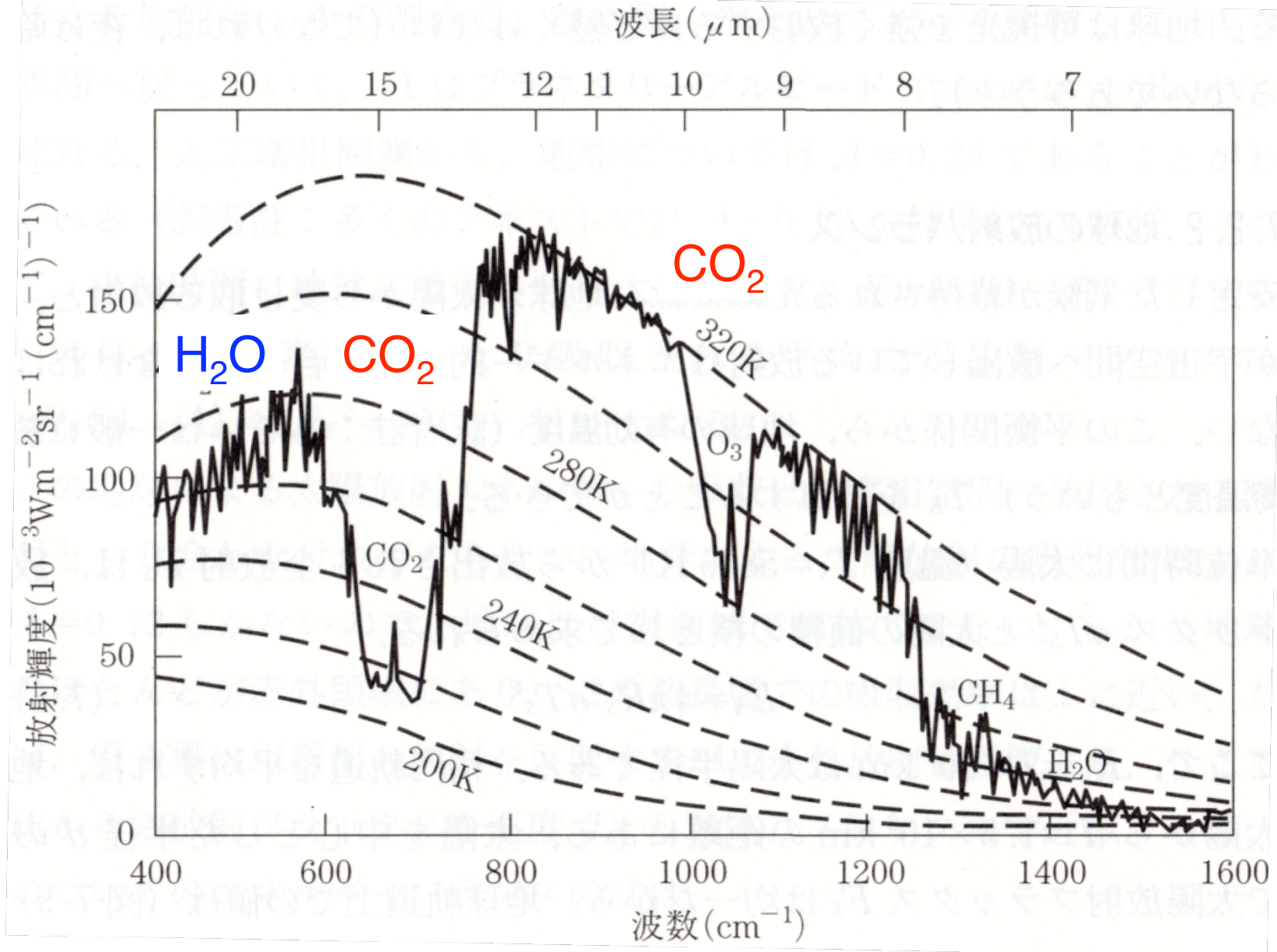


太陽放射スペクトル



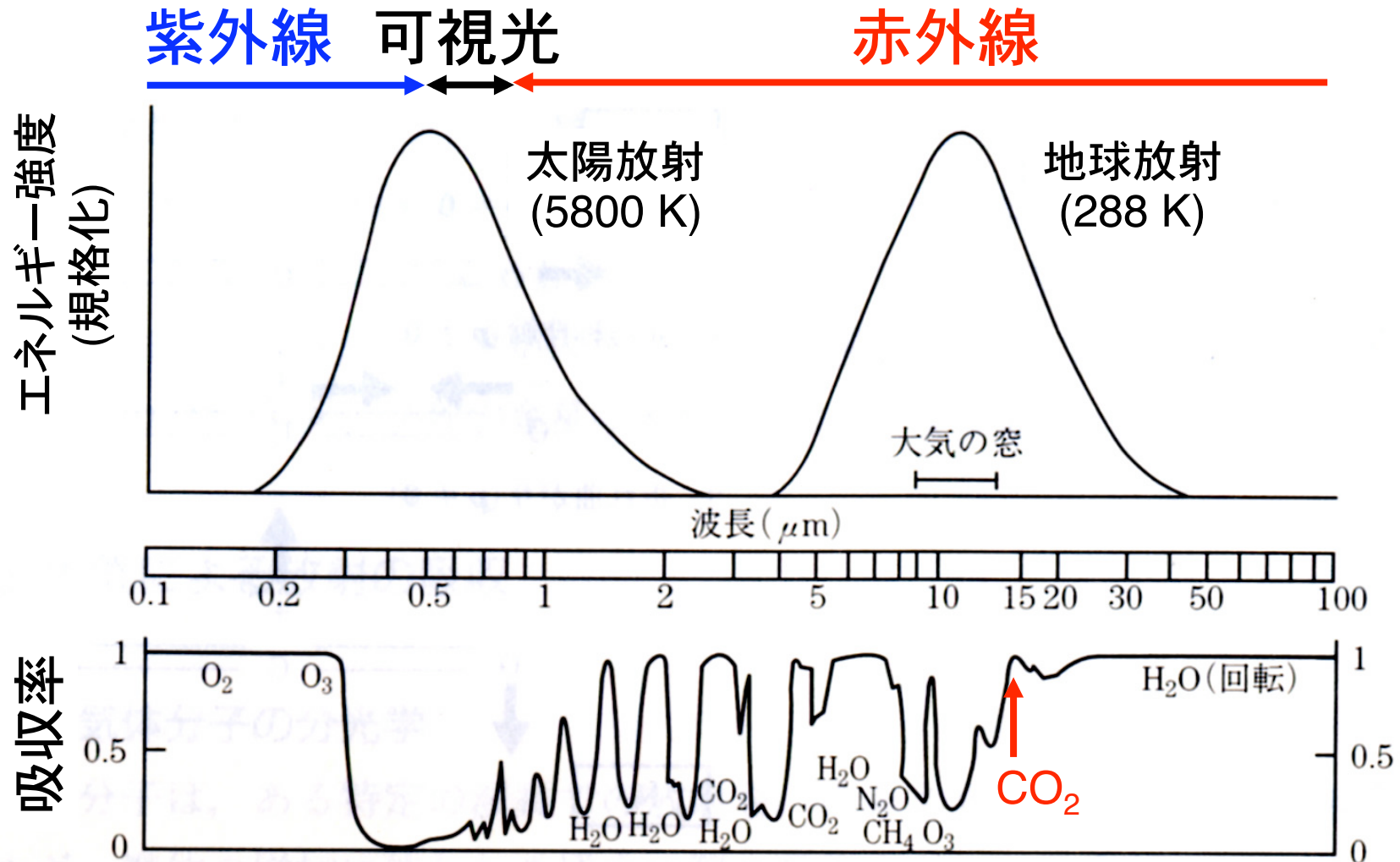


地球放射スペクトル





太陽放射と地球放射の吸収率





地球表層における太陽放射の反射と吸収

➤ 反射率: 31 %

地表面: 6 %

雲: 17 %

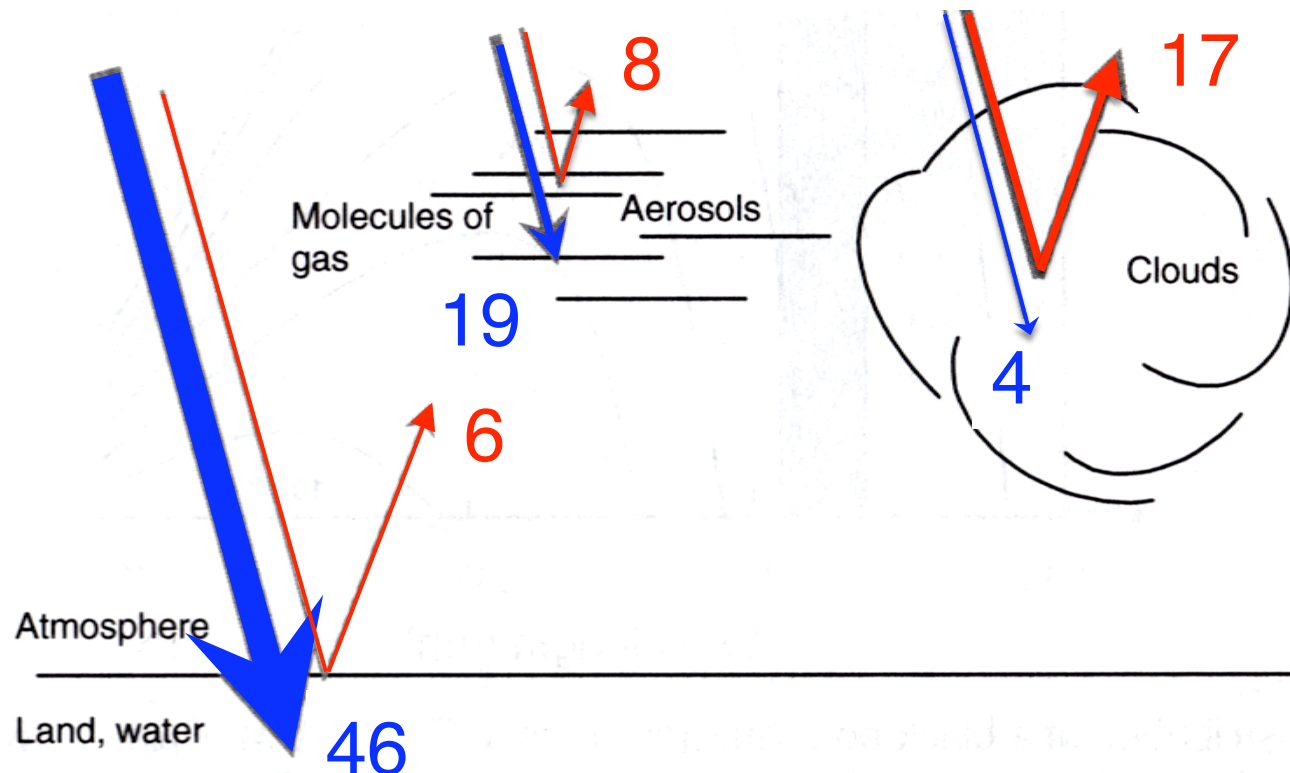
エアロゾル: 8 %

➤ 吸収率: 69 %

地表面: 46 %

雲: 4 %

エアロゾル・ガス: 19 %





アルベド(albedo)

地球に入射した太陽放射：散乱，反射，吸収

$$\text{アルベド} = \frac{\text{反射された太陽放射量}}{\text{入射した太陽放射量}}$$

	太陽からの平均 距離(天文単位)	入射放射量 (W m^{-2})	アルベド	放射平衡 温度	平均表面 温度(K)	表面気圧 (気圧)
金星	0.72	2.60×10^3	0.78	224	735	90
地球	1.00	1.37×10^3	0.30	255	288	1
火星	1.52	0.58×10^3	0.16	216	230	0.006
木星	5.20	0.05×10^3	0.73	88	130*	2*

* 雲の表面における値.

3. 温室効果

- ①IPCCの地球温暖化論
- ②温室効果
- ③地球の放射平衡温度
- ④温室効果の重要性
- ⑤地球大気システムにおける放射収支



IPCCの地球温暖化論

温室効果ガス、特に人類活動由来のCO₂により
下層大気と地表の気温が上昇する現象

多量のCO₂が放出

産業革命

大気中に蓄積

地球温暖化

IPCC

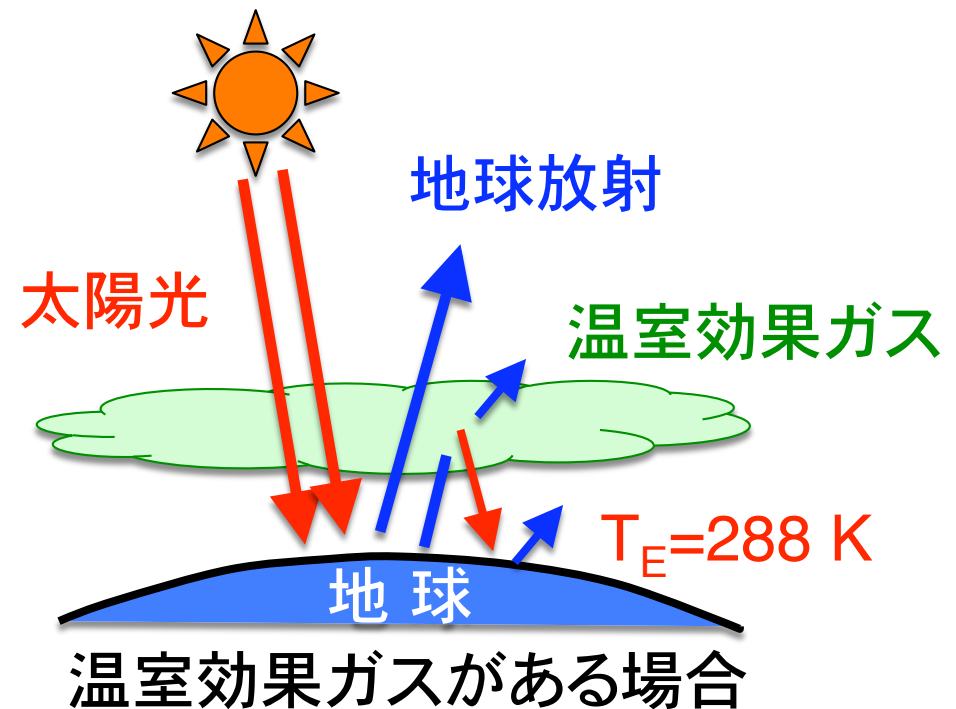
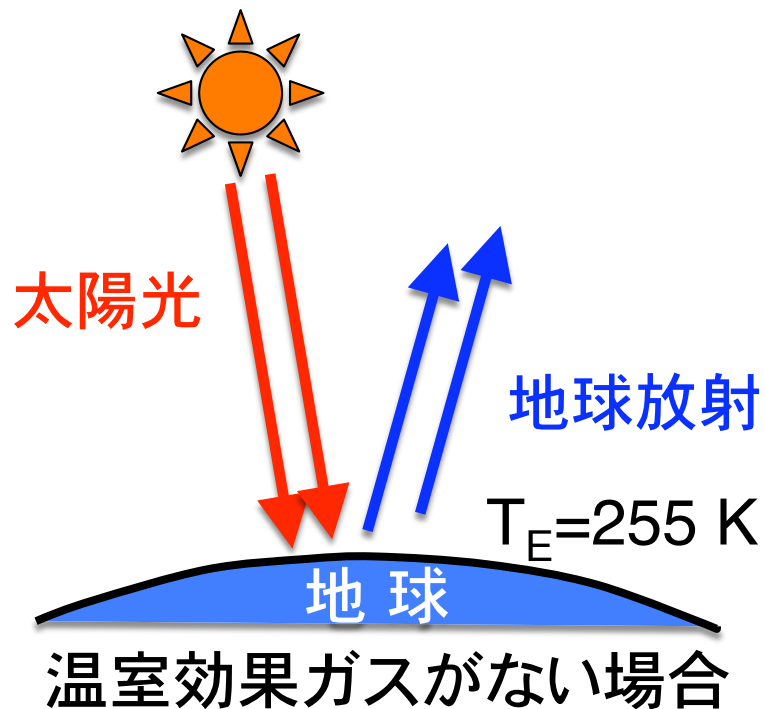
気候変動に関する政府間
パネル(Intergovernmental
Panel on Climate Change)



温室効果

地球放射の一部が、温室効果ガスによって吸収され、地球に向かって放射されることにより、下層大気と地表の気温を上昇させる効果

温室効果 = 地球を 33 K 暖める効果

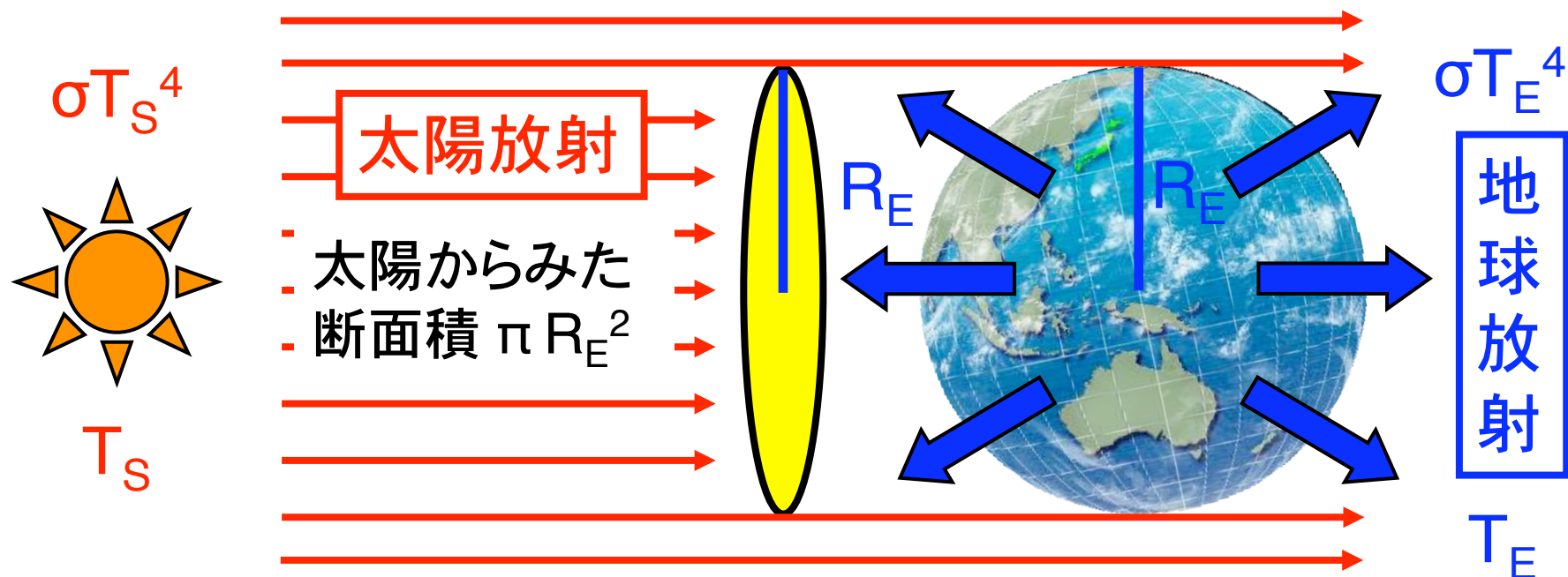




地球の放射平衡温度

放射平衡 安定した気候条件

地球が太陽から受け取る放射(太陽放射)
= 地球から宇宙空間に放出する放射(地球放射)





地球の放射平衡温度

➤地球が太陽から受け取る放射量

$$E_{\text{in}} = S_0(1-A) \cdot (\pi R_E^2) \quad \text{①}$$

➤地球から宇宙空間に放出する放射量

$$E_{\text{out}} = \sigma T_E^4 \cdot (4\pi R_E^2) \quad \text{②}$$

①, ②より

$$T_E = \left(\frac{S_0(1-A)}{4\sigma} \right)^{\frac{1}{4}}$$

S_0 : 太陽定数
 A : 地球アルベド
 R_E : 地球の半径
 T_E : 地球表面温度

$T_E = 255 \text{ K}$ となることを確認せよ



温室効果の重要性

温室効果を ΔE とすると, ①, ②より

$$\sigma T_E^4 = \frac{S_0(1-A)}{4} + \Delta E$$

$$\sigma T_E^4 = (5.67 \times 10^{-8})(288^4) = 390 \text{ W m}^{-2}$$

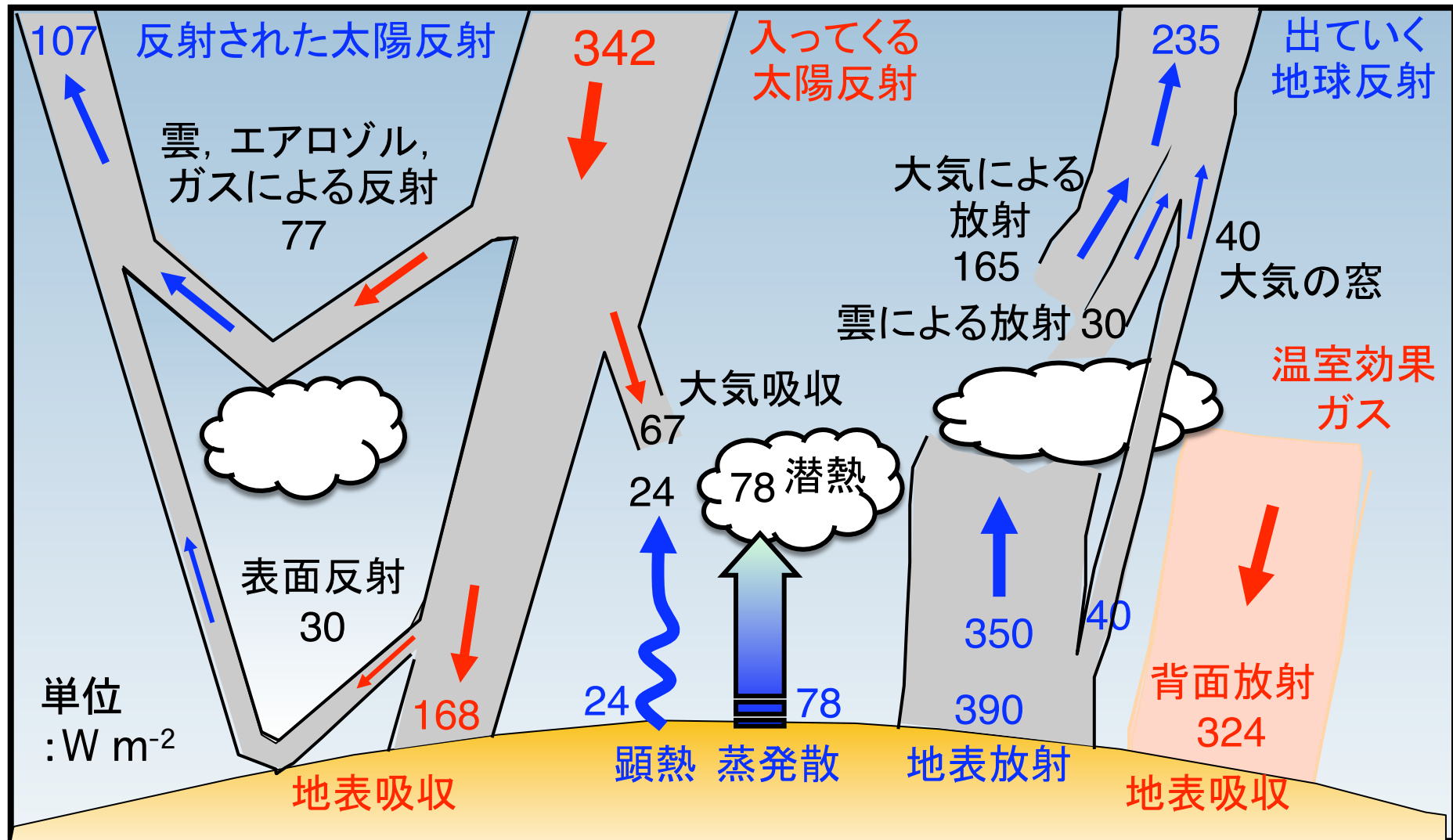
$$\frac{S_0(1-A)}{4} = \frac{1370 \times (1-0.30)}{4} = 240 \text{ W m}^{-2}$$

$$\therefore \Delta E = 390 - 240 = 150 \text{ W m}^{-2}$$

地球放射の約40%!



地球大気システムの放射収支

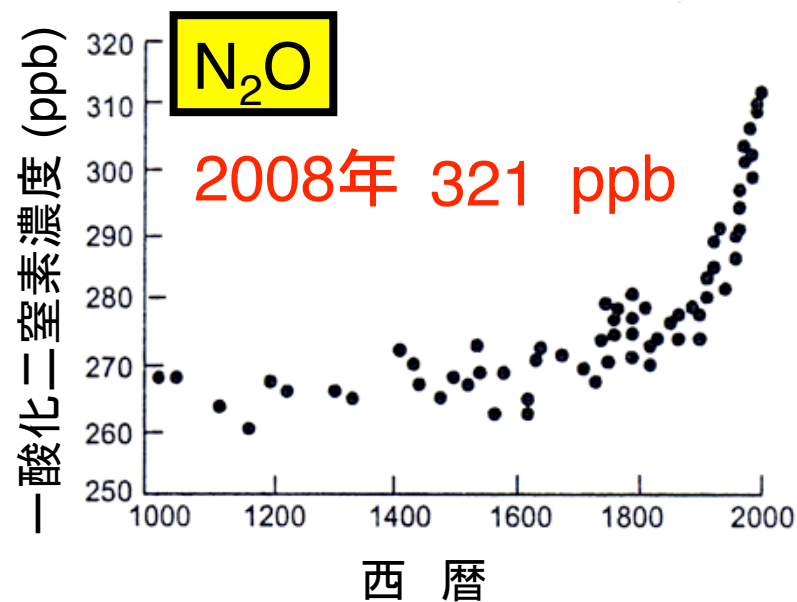
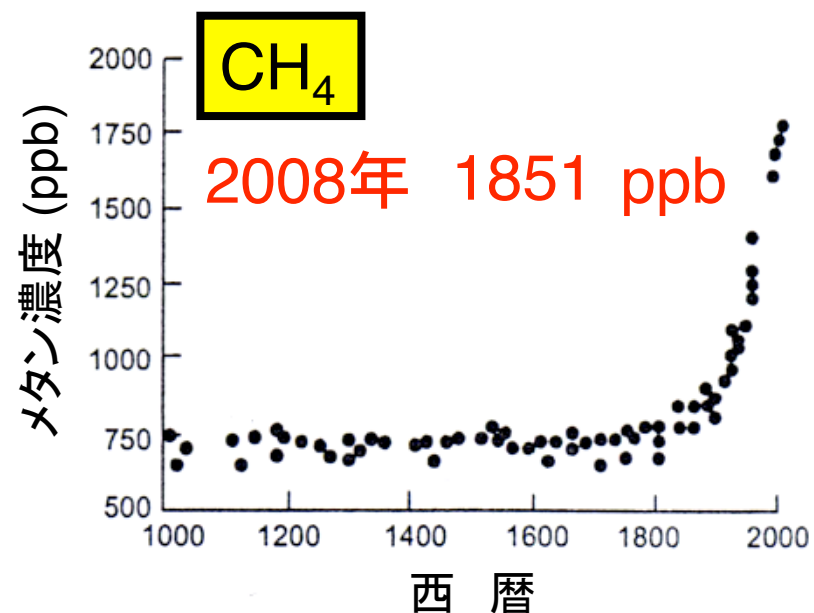
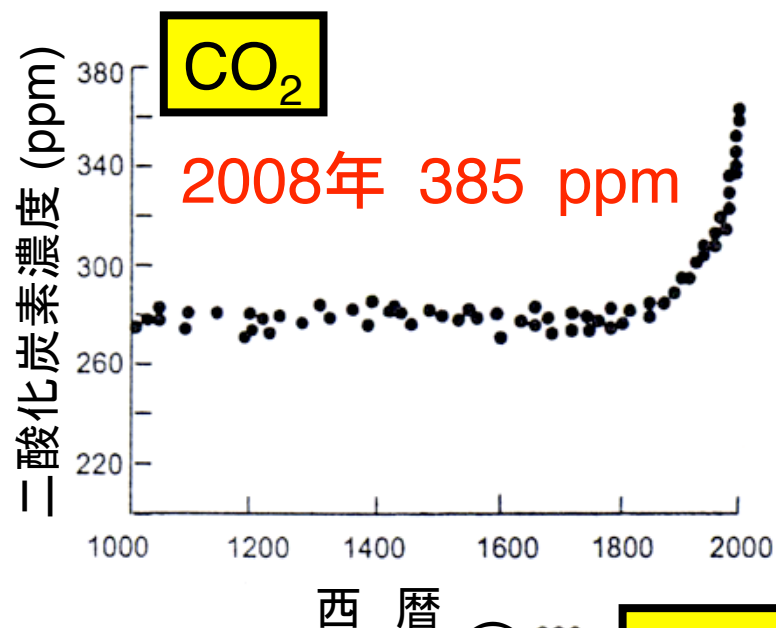


21

4. 温室効果ガス



温室効果ガスの濃度





気体分子による電磁波の吸収

気体分子

内部エネルギー準位を増加させる特定波長の放射(電磁波)のみを吸収

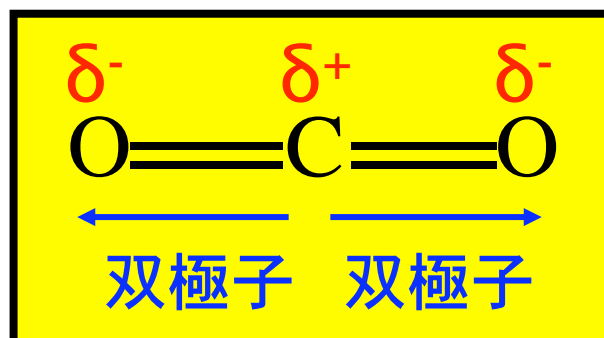
- 電子遷移: 紫外放射 ($< 0.4 \mu\text{m}$)
- 振動遷移: 近赤外線 ($0.7 - 20 \mu\text{m}$)
- 回転遷移: 遠赤外線 ($> 20 \mu\text{m}$)

地球放射: 大部分が $5 - 50 \mu\text{m}$ (赤外線)

→ 振動遷移, 振動-回転遷移

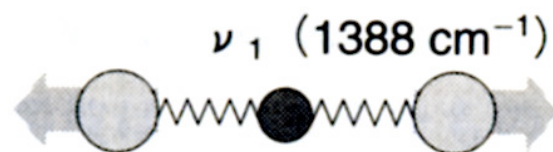


CO₂の基準振動

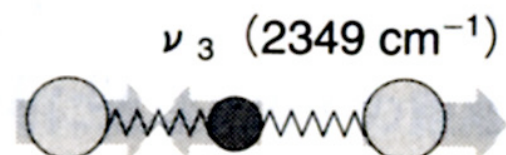


(a)

対称伸縮



双極子モーメント $\mu=0$



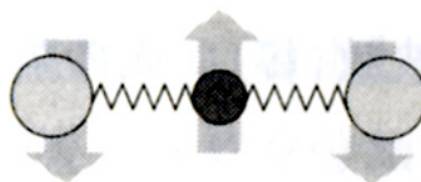
双極子モーメント $\mu \neq 0$

非対称伸縮

(b)

$\lambda = 15 \mu\text{m}$

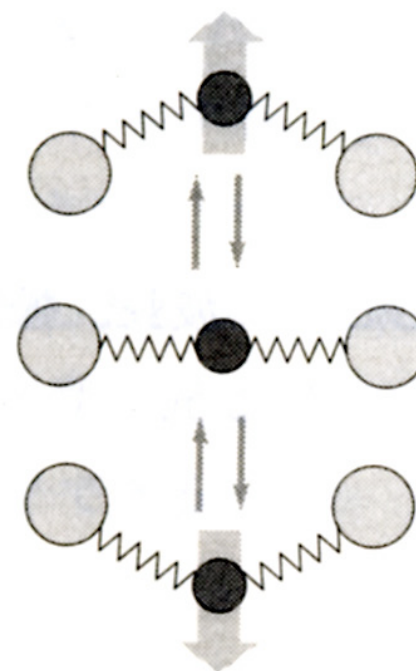
ν_2 (667 cm^{-1})



折れ曲がり

$\mu \neq 0$

$\mu \neq 0$



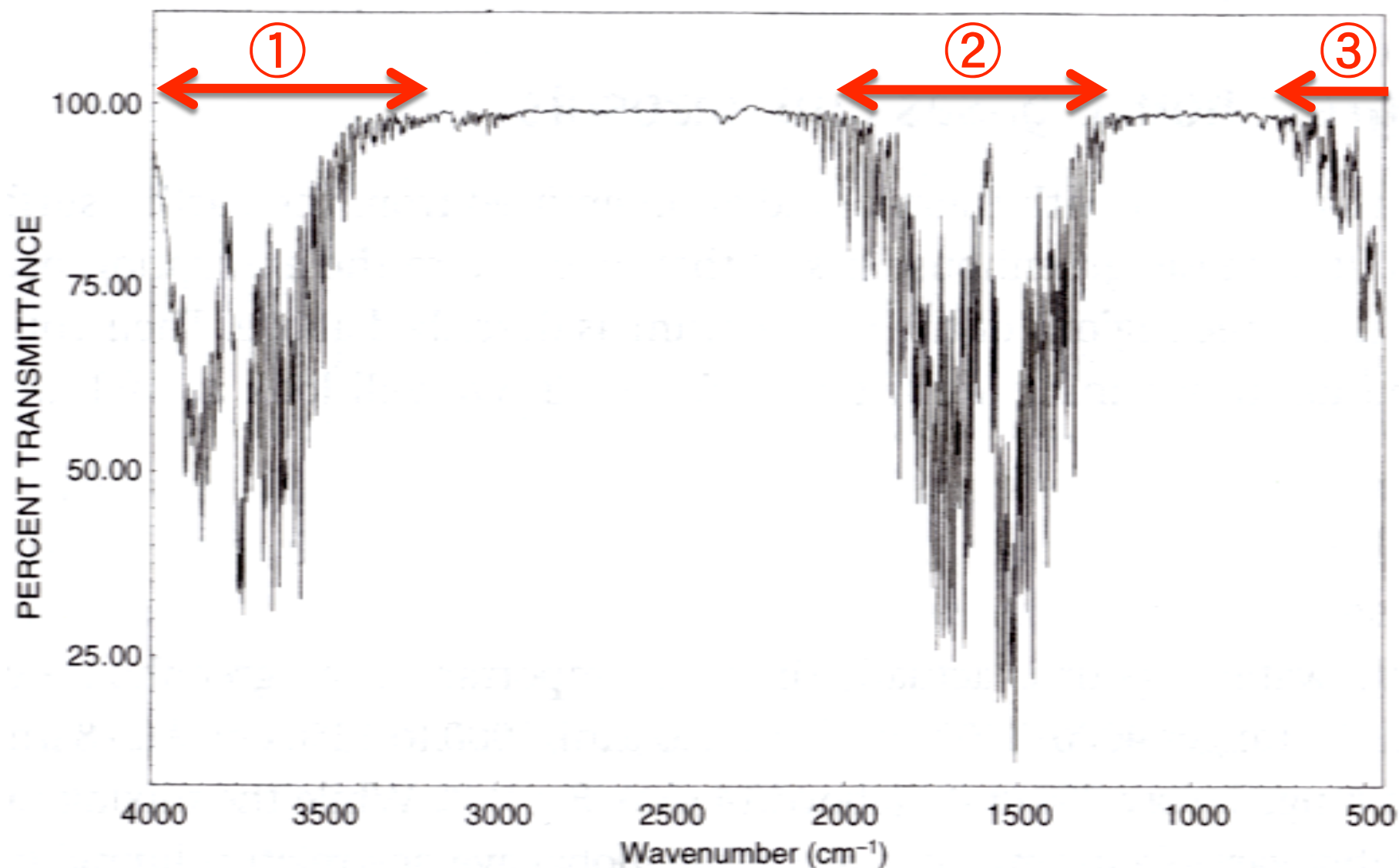


温室効果ガス：水蒸気

- ・最も重要な温室効果ガス
- ・赤外線吸収波数(波長)
 - ① $4000 \sim 3000 \text{ cm}^{-1}$ ($2.5 \sim 3.0 \mu\text{m}$)
 - ② $2000 \sim 1250 \text{ cm}^{-1}$ ($5 \sim 8 \mu\text{m}$)
 - ③ 700 cm^{-1} 未満 ($14 \mu\text{m}$ 以上)
- ・時空間変動：大
- ・地球規模の相対湿度平均：1 %
- ・人類活動による増加の証拠はない
- ・正と負のフィードバック
- ・温室効果：100 W m^{-2}



水蒸気の赤外スペクトル





温室効果ガス：二酸化炭素

- ・重要な温室効果ガス

- ・赤外線吸収波数(波長)

- ① $2500 \sim 2300 \text{ cm}^{-1}$ ($4.0 \sim 4.3 \mu\text{m}$)

- ② $710 \sim 530 \text{ cm}^{-1}$ ($14 \sim 19 \mu\text{m}$)

- $670 \sim 630 \text{ cm}^{-1}$ (**$15 \sim 16 \mu\text{m}$**)でとくに吸収大

- ・主な発生源

- 自然起源：動植物の呼吸, バイマス燃焼

- 人為起源：化石燃料の燃焼, 森林破壊・燃焼

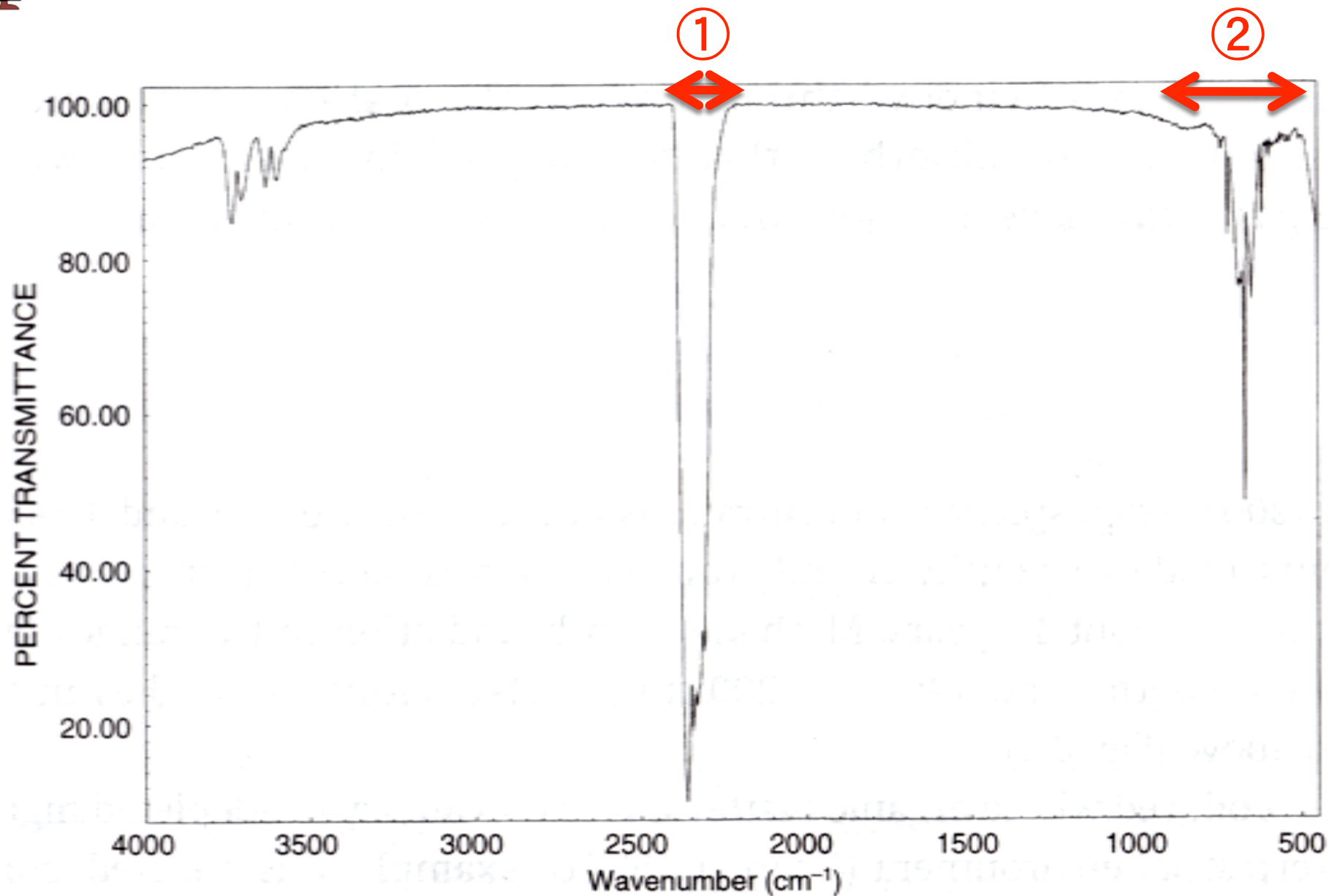
- ・主な消失源

- 光合成, 海洋吸収

- ・温室効果： **50 W m^{-2}**

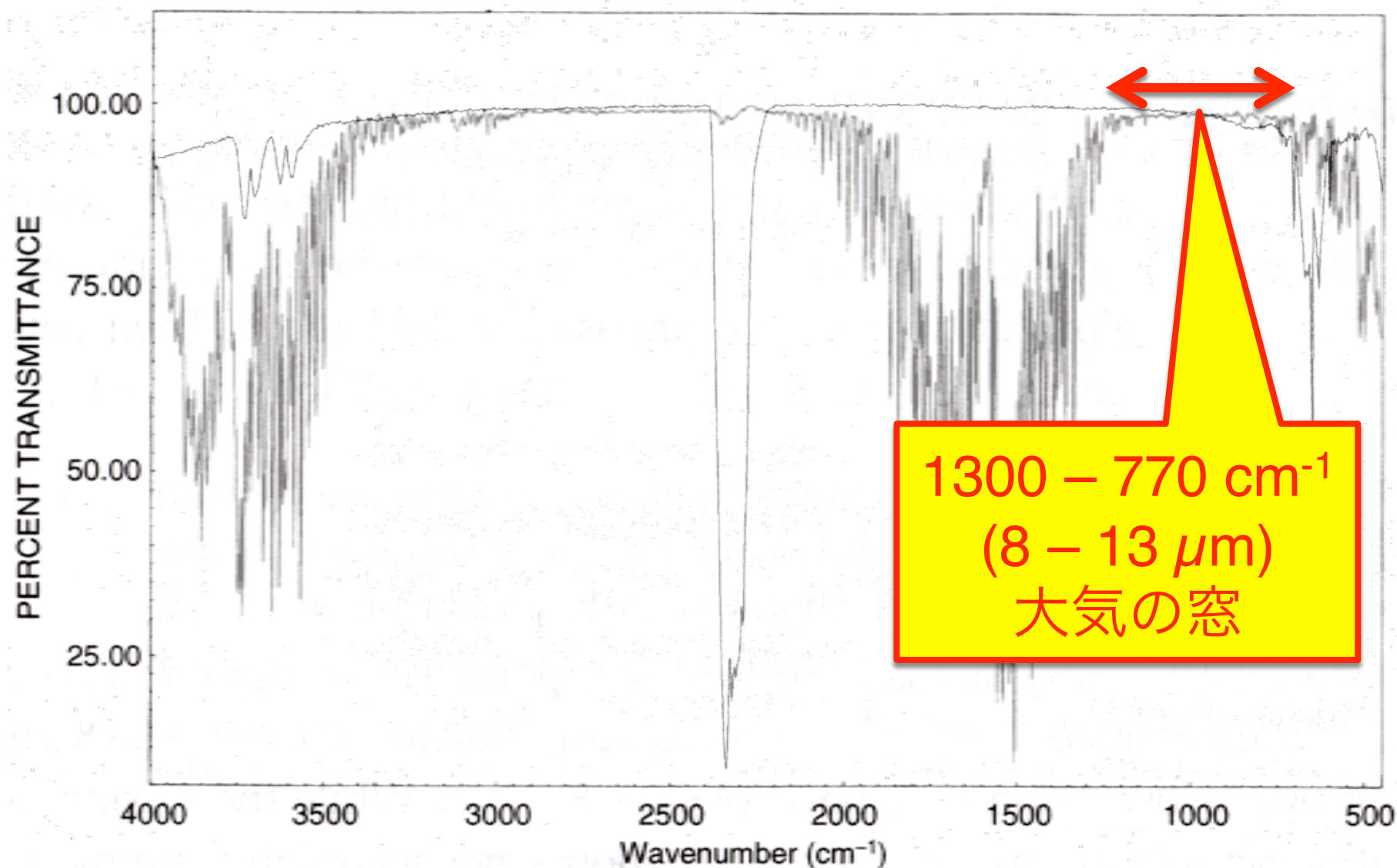


二酸化炭素の赤外スペクトル





温室効果ガス：水蒸気と二酸化炭素



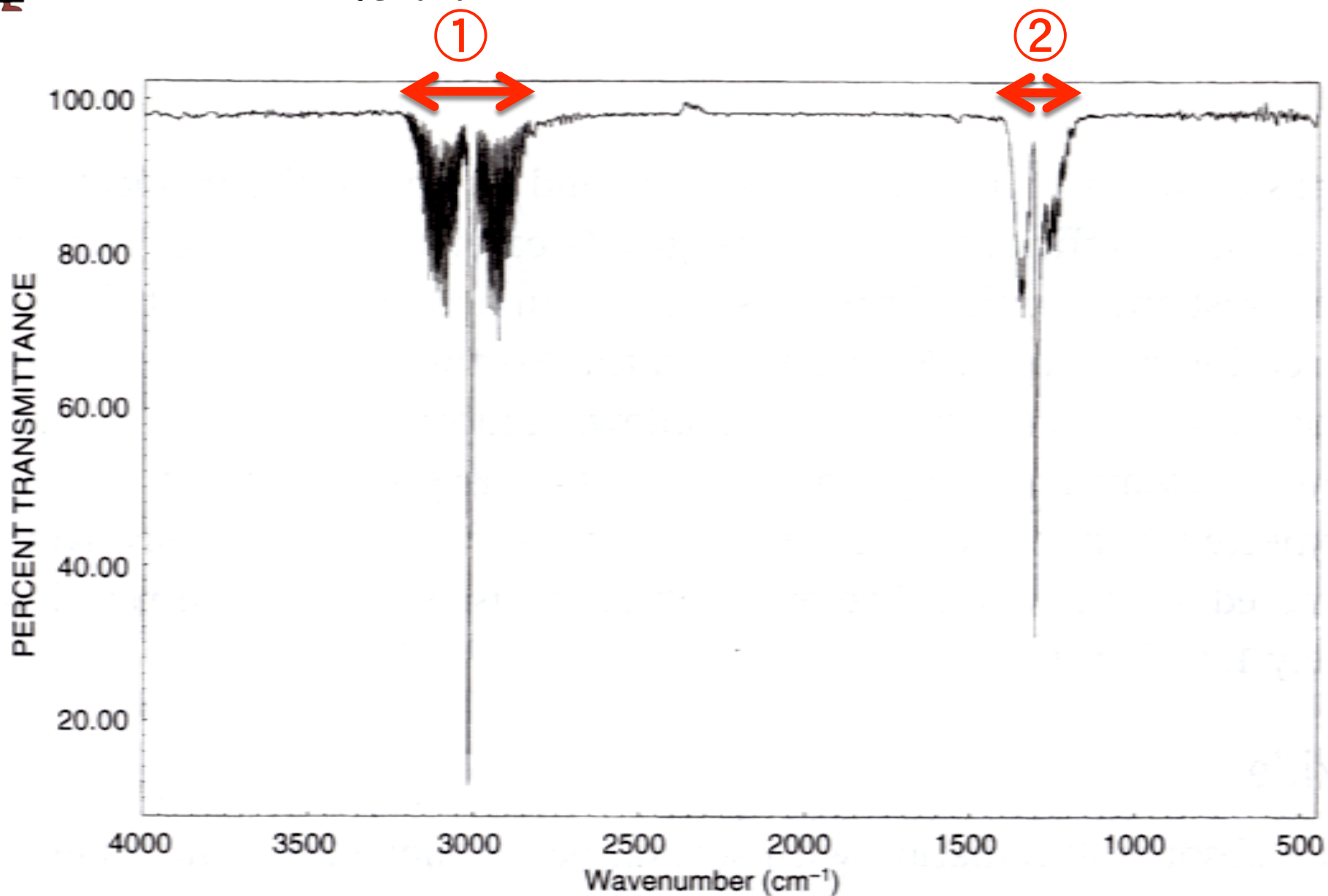


温室効果ガス：メタン

- ・濃度(2003) 南半球:1.78 ppmv, 北半球:1.84 ppmv
 - ・赤外線吸収波数(波長)
 - ① $3300 \sim 2800 \text{ cm}^{-1}$ ($3.0 \sim 3.6 \mu\text{m}$)
 - ② $1400 \sim 1200 \text{ cm}^{-1}$ ($7.1 \sim 8.3 \mu\text{m}$)
 - ・主な発生源
 - 自然起源: 湿地, 田んぼ, 反芻動物の消化管
 - ・主な消失源
 - $\cdot\text{OH}$ による分解, 土壌による吸収, 成層圏への輸送
- $$\text{CH}_4 + \cdot\text{OH} \rightarrow \cdot\text{CH}_3 + \text{H}_2\text{O}$$
- ・温室効果: 1.7 W m^{-2}



メタンの赤外スペクトル





温室効果ガス：一酸化二窒素

- ・赤外線吸収波数(波長):

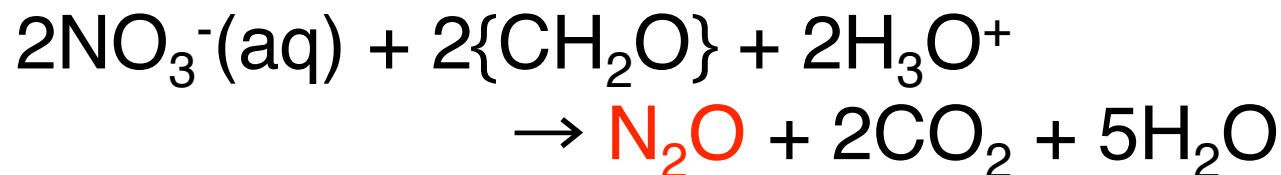
2000 cm⁻¹ 以上 (3.0 μm以下)でいくつかのピーク

① 1350 ~ 1150 cm⁻¹ (7.4 ~ 8.7 μm) 窓領域

- ・主な発生源

自然起源: 土壌・湖沼・海洋からの脱窒

人為起源: 埋立地, 污水处理場

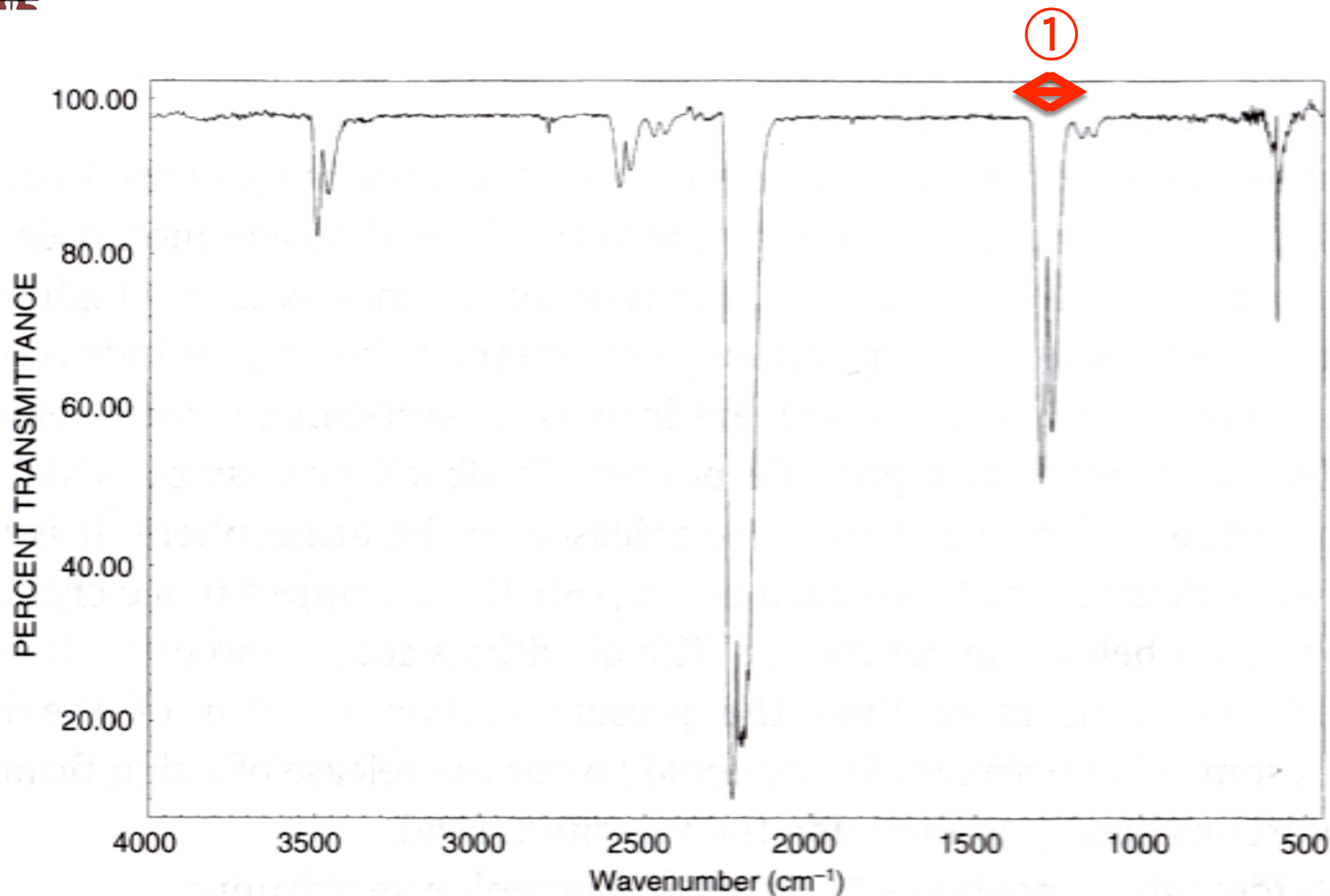


- ・主な消失源

成層圏への輸送(寿命 120 年)



一酸化二窒素の赤外スペクトル





温室効果ガス：フロン類

- ・赤外線吸収波数(波長):

① $1250 \sim 830 \text{ cm}^{-1}$ (8 ~ 12 μm) 窓領域

CFC-12: $1250, 830 \text{ cm}^{-1}$ (9.5, 11.1 μm)

- ・最近注目されている工業起源のフロン類

氷晶石(Na_3AlF_6)中アルミナの炭素電極での電解

CF_4 : テトラフルオロメタン

C_2F_6 : ヘキサフルオロエタン

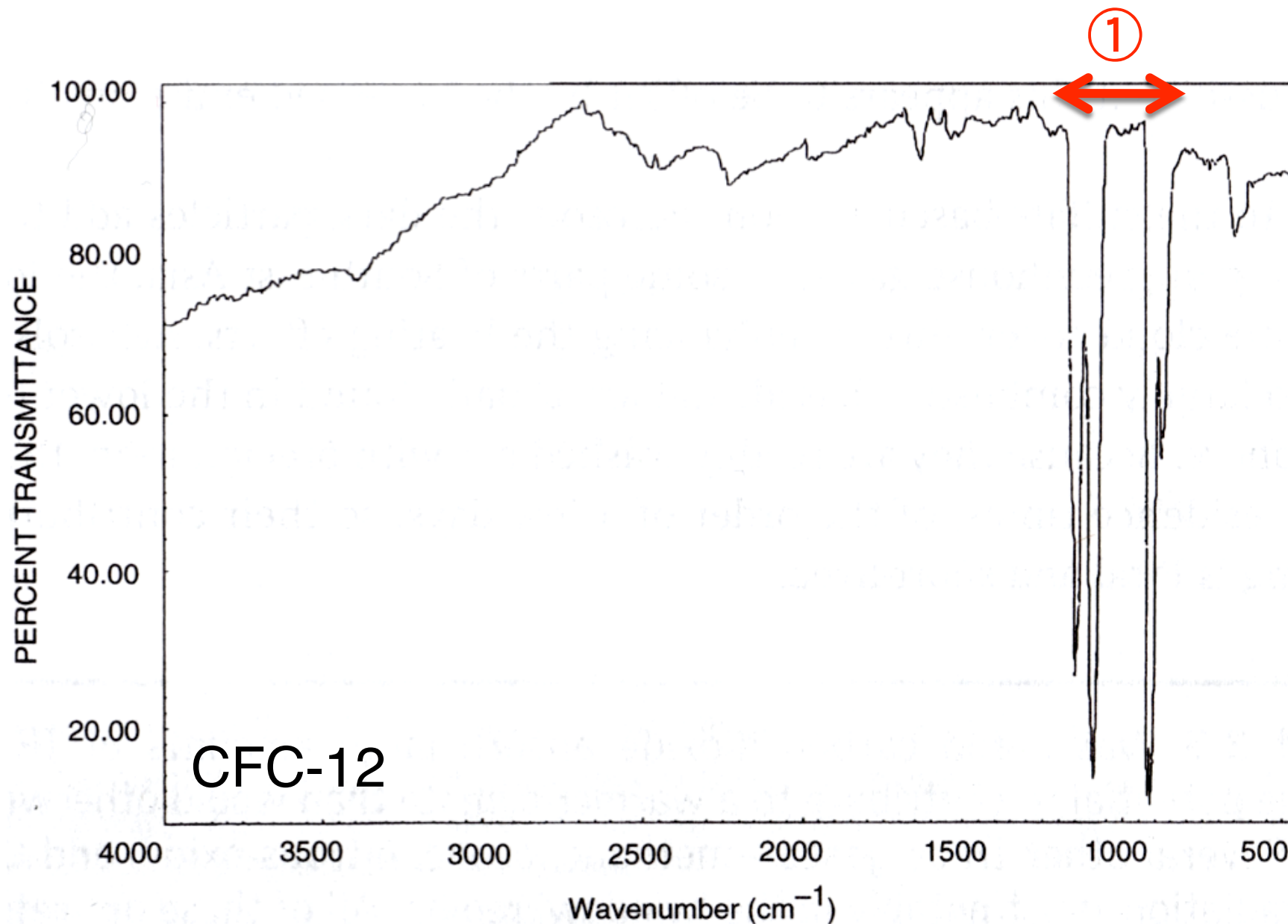
マグネシウム精錬によって発生

SF_6 : 六フッ化硫黄

1970年: 0.03 pptv $\rightarrow$ 2008年: 6.85 pptv



CFC-12の赤外スペクトル





温室効果ガスの特性

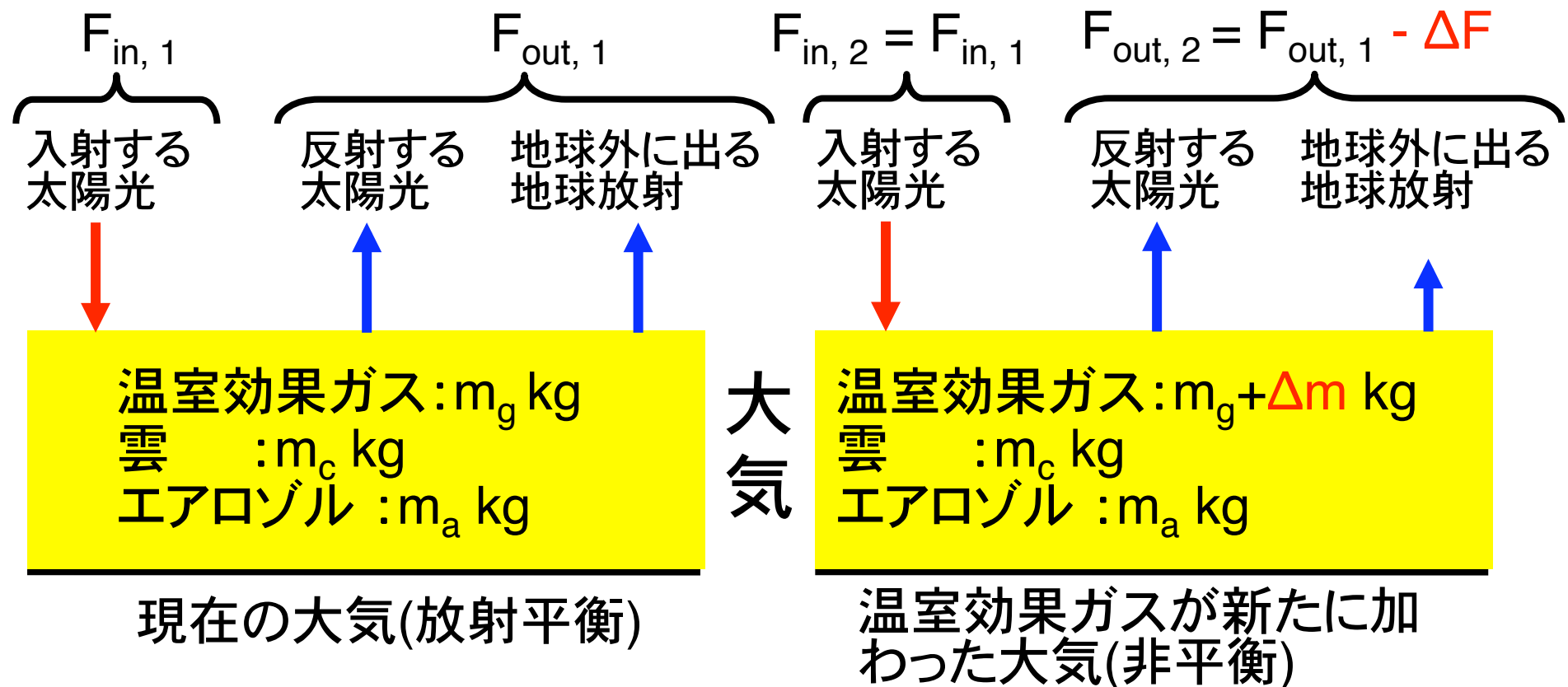
Gas	Residence time / y ^a	Relative instantaneous radiative forcing	Global warming potential (GWP) ^c
CO ₂	50–200 ^b	1	1
CH ₄	12	43	23
N ₂ O	115	250	296
CFC-11	45	15 000	4 600
CFC-12	102	19 000	10 600
HCFC-22	12	13 000	1 700
CCl ₄	35		1 800
C ₂ F ₆	10 000		11 900
SF ₆	3 200		22 200



放射強制力

温室効果ガスの質量増加に伴って生じる

放射フラックス の変化量 ($\Delta F = F_{in,2} - F_{out,2}$)

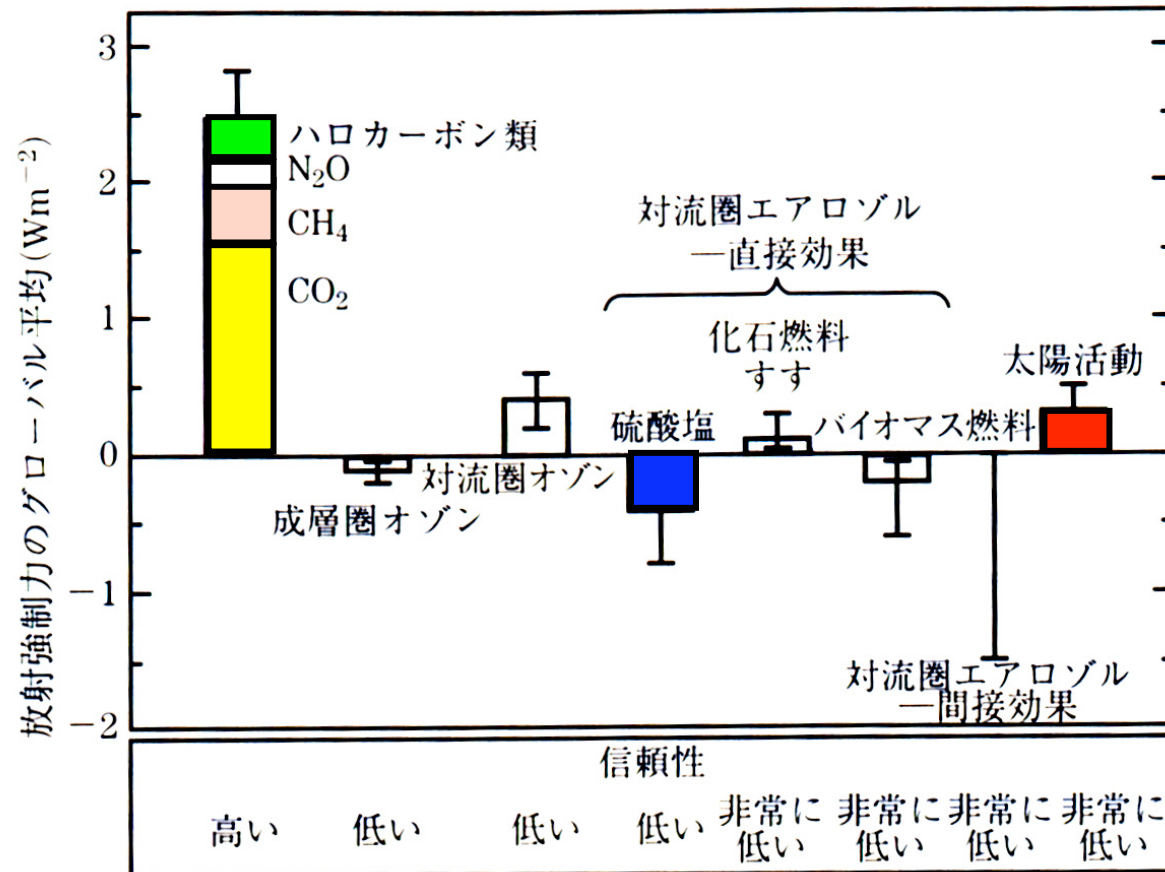




IPCCによる放射強制力の評価

- ・温室効果ガス > 太陽活動
- ・エアロゾル: 負の強制力(冷却化効果)

(1850年からの平均)





地球温暖化指数

Global Warming Potential

$$\text{GWP} = \frac{(\text{気体X 1kgの放射強制力})}{(\text{CO}_2 \text{ 1kgの放射強制力})}$$

$$= \frac{\int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} \Delta F_{1\text{kg X}} dt}{\int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} \Delta F_{1\text{kg CO}_2} dt}$$

- ・時間的な濃度低下を補正(滞留時間を考慮)
- ・一定期間の温室効果の積算値



温室効果ガスのGWP

気体	滞留時間 年	それぞれの期間の地球温暖化指数		
		20年間	100年間	500年間
CO ₂	50 -200	1	1	1
CH ₄	10	62	25	8
N ₂ O	120	290	320	180
CFC-11	103	7900	8500	4200
HCFC-123	1.4	300	93	29
SF ₆	3200	16500	24900	36500

- ・フロン、SF₆: **大気之窗(8-13 μ m)**での吸収のためGWP高い。
- ・寿命の短い物質: 長期間になるほど寄与は小さい。
- ・優先的に削減すべき温室効果ガスが分かる。

41

4. 地球温暖化の影響



想定される地球規模の災害

1) 海面上昇・海流の変化

沿岸部の水没、地下水の塩水化、気候変動

2) 異常気象

集中豪雨、大規模な竜巻・台風の発生、
猛暑、異常な寒冷化

3) 乾燥化

食糧不足、水不足、山火事発生頻度の増加

4) 生態系の変化

植生・病害虫の生息域の変化
寒冷地の動植物の絶滅



地球温暖化による水循環の変化

気候モデルの予測

- ・水循環(蒸発量、降水量、流出量): 促進
- ・雲量の増加 → 温暖化 を抑制
- ・北米&アジア(Manabe & Weathers)
土壌水分の減少 → 乾燥地域の増加
比熱: 水 > 土 → 暖まりやすさ: 海洋 < 陸
↓
蒸発速度: 海水 < 陸水
- ・降水量・気温変化 → 植生分布 基礎生産力 変化

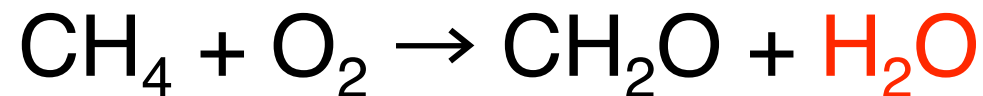


温暖化予測を支持する観測

Oltmans & Hofmann (1995)

- ・場所: 米国コロラド州ボルダー上空
- ・観測: 成層圏水蒸気の増加 (1981-1994)

原因の一つ: 成層圏での メタン分解



しかし、

水蒸気増加量 $>$ メタン分解量

→ メタンでは説明できない



温暖化予測を支持する観測

1487箇所の気象ステーションの降雨データ解析

降水量

予測・関連現象

北半球中緯度地域: 増加 温暖化予測と一致

北アフリカ・中東: 減少 サヘルで干魃増加

多くの地域: 変動大 干魃増加

長期間の降雨量データ不足

→ 衛星によるリモセン





温暖化予測を支持する観測

降水量の増加 → 流出量の増加？

Probst & Tardy (1987)

世界の主要河川：流出量 3 %増加(過去65年)

流出量増加の要因

地球温暖化

植生 の破壊

高CO₂生育に伴う植物の水利用効率の増大



温暖化予測を支持する観測

海水面に影響を及ぼす因子

- 地殻変動 : 海底山脈体積の増減
- 地球の気温 : 氷河作用

- ・最終氷期(18,000 年前)

42,000 x 10³ km³の海水を極地に固定
(海水の 3 %)

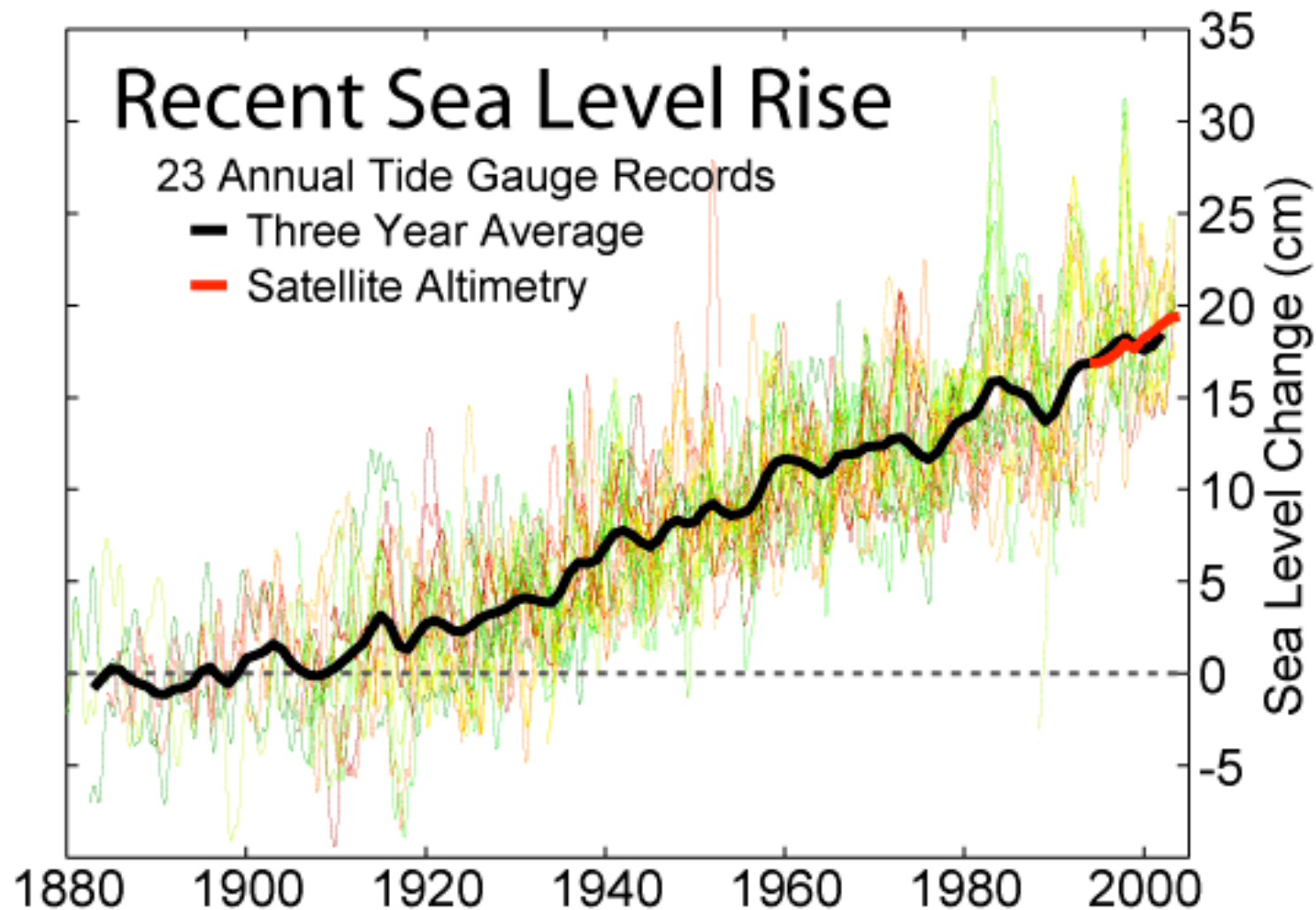
➡ 海面: 現在より 120 m低

- ・氷期: H_2^{18}O が豊富

∴ 蒸発速度: $\text{H}_2^{18}\text{O} < \text{H}_2^{16}\text{O}$



最近の海水面変化(参考図)





海水面上昇の原因

海水面上昇の原因

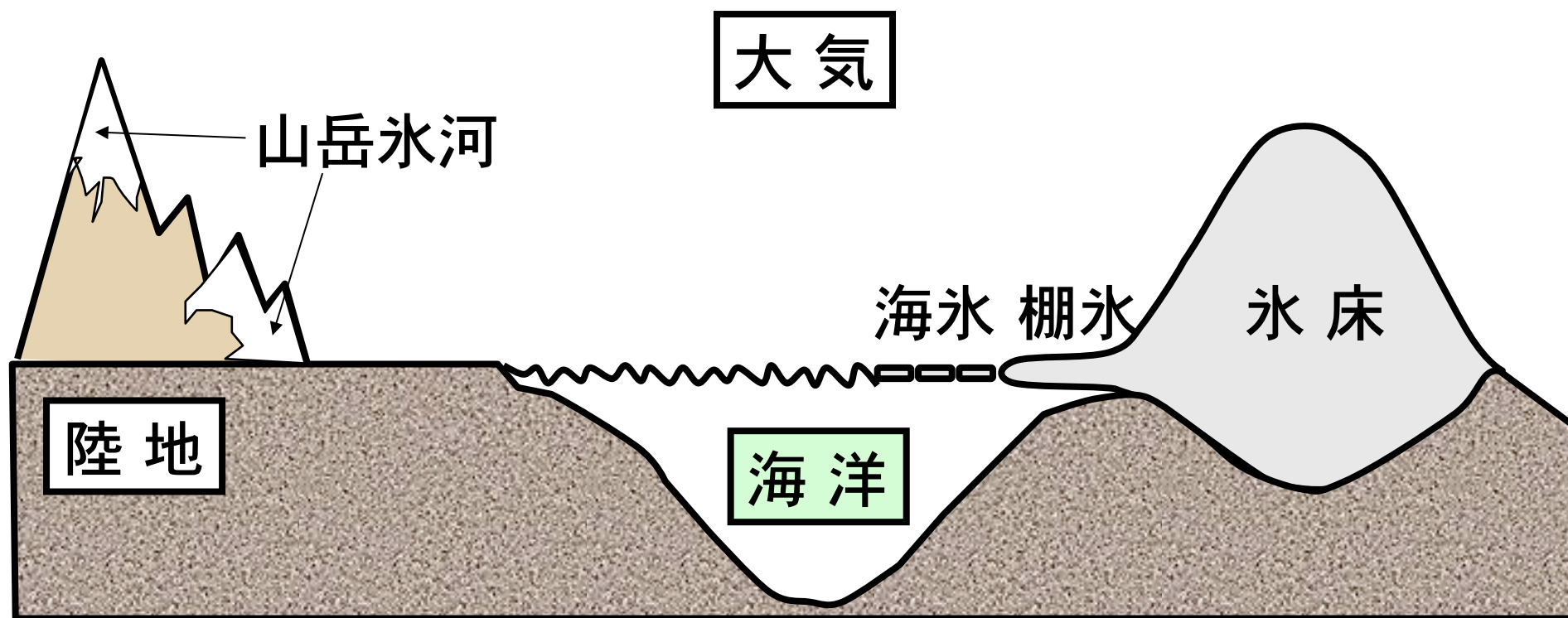
- ・表層海水温度の上昇による 熱膨張
- ・ 地下水汲み上げ と河川への排出
- ・ 山岳氷河 の融解

現時点では、グリーンランドと南極大陸の氷床の減少は確認できない

➡ 衛星リモートセンシングの利用



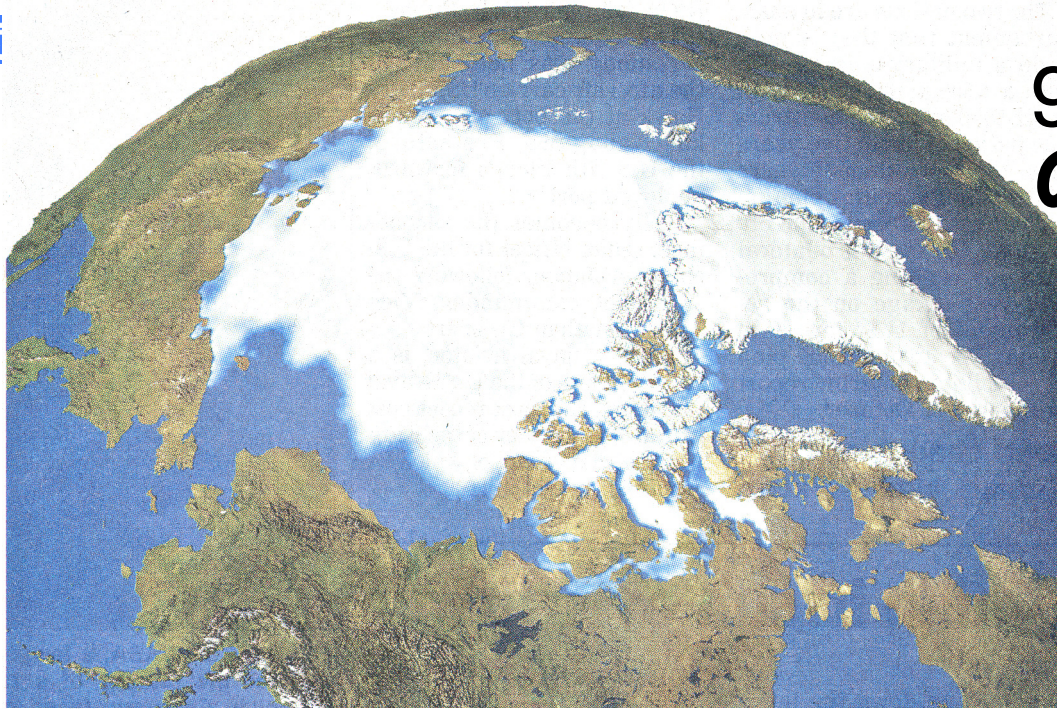
山岳氷河・棚氷・海氷



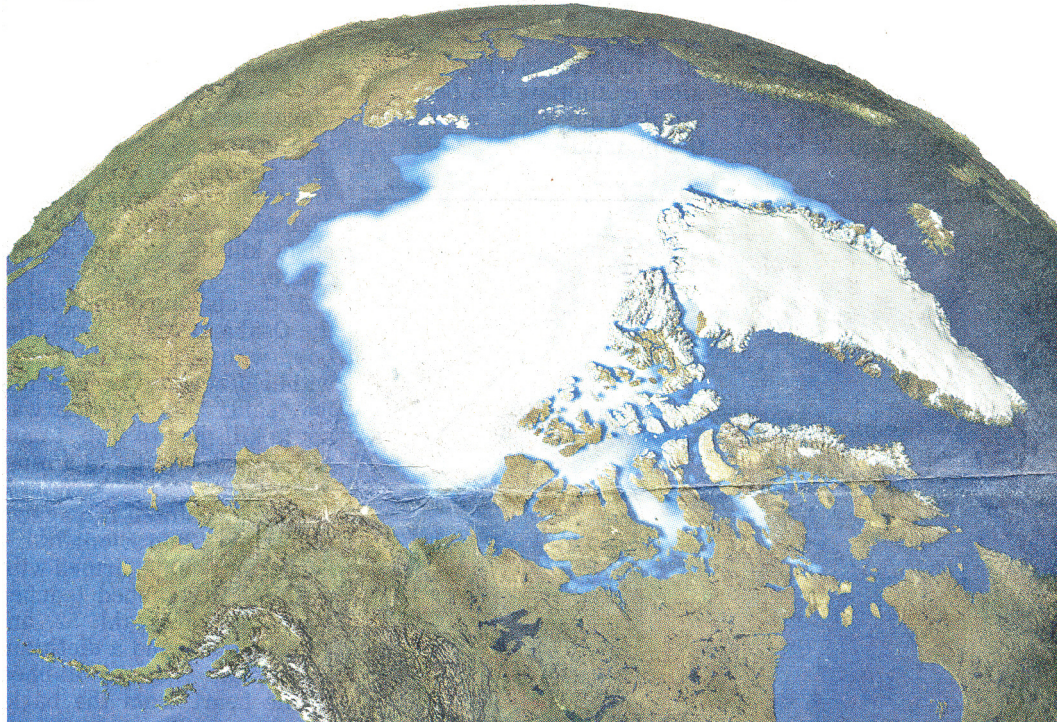


9月の北極海の海氷(NASA)

1979年



2005年



海氷面積

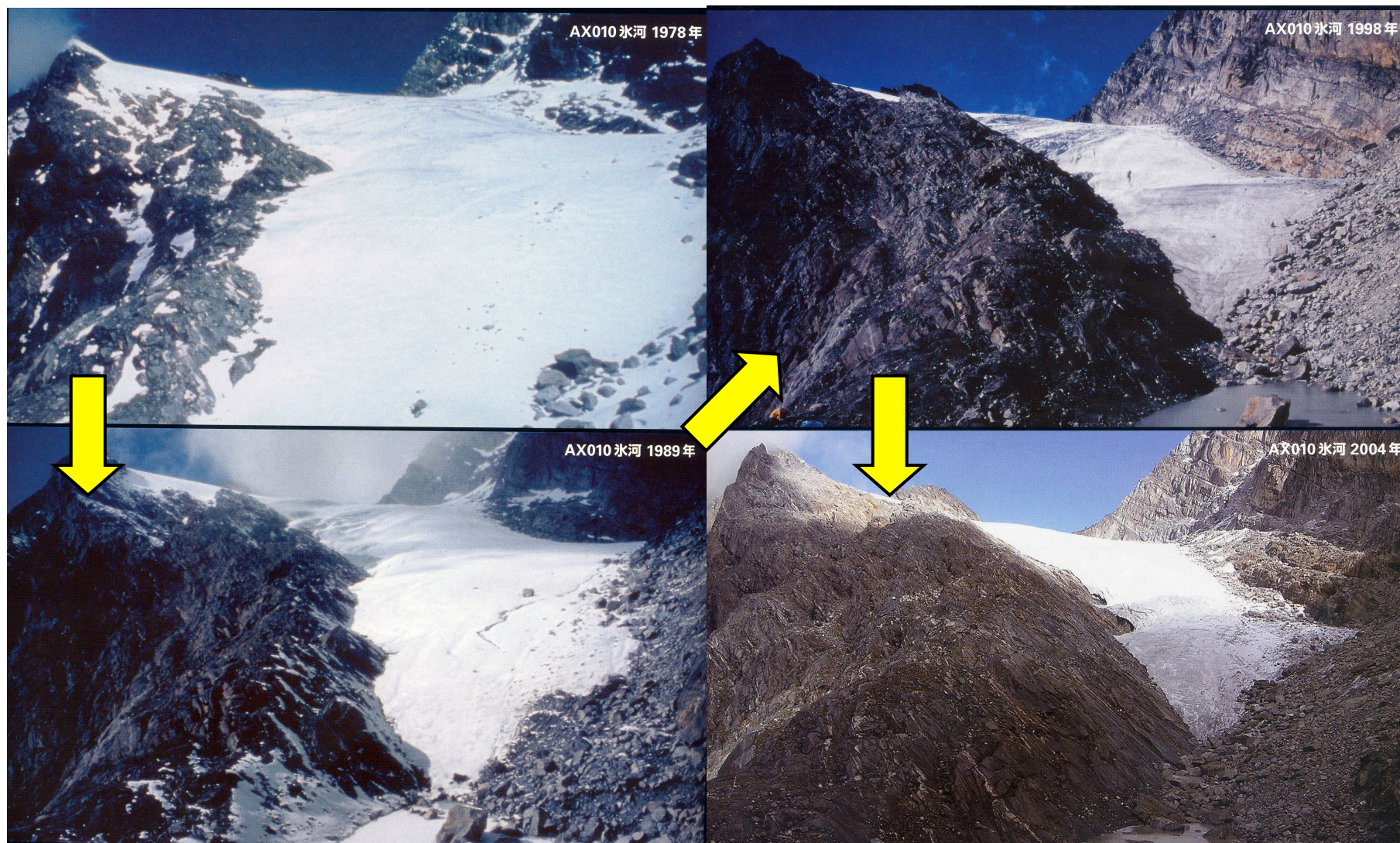
20%減少

気温

3°C高い

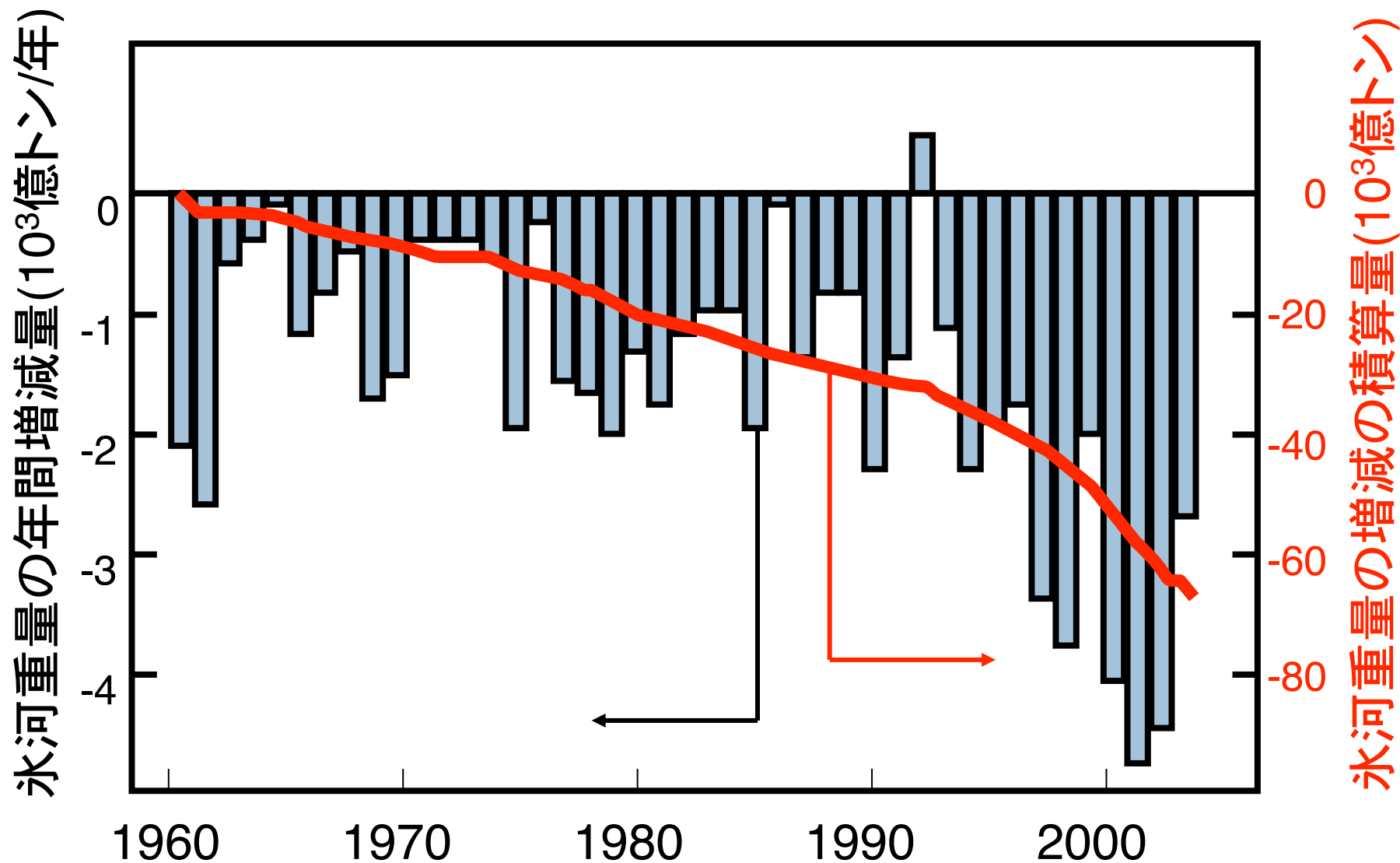


ヒマラヤで進む氷河の衰退



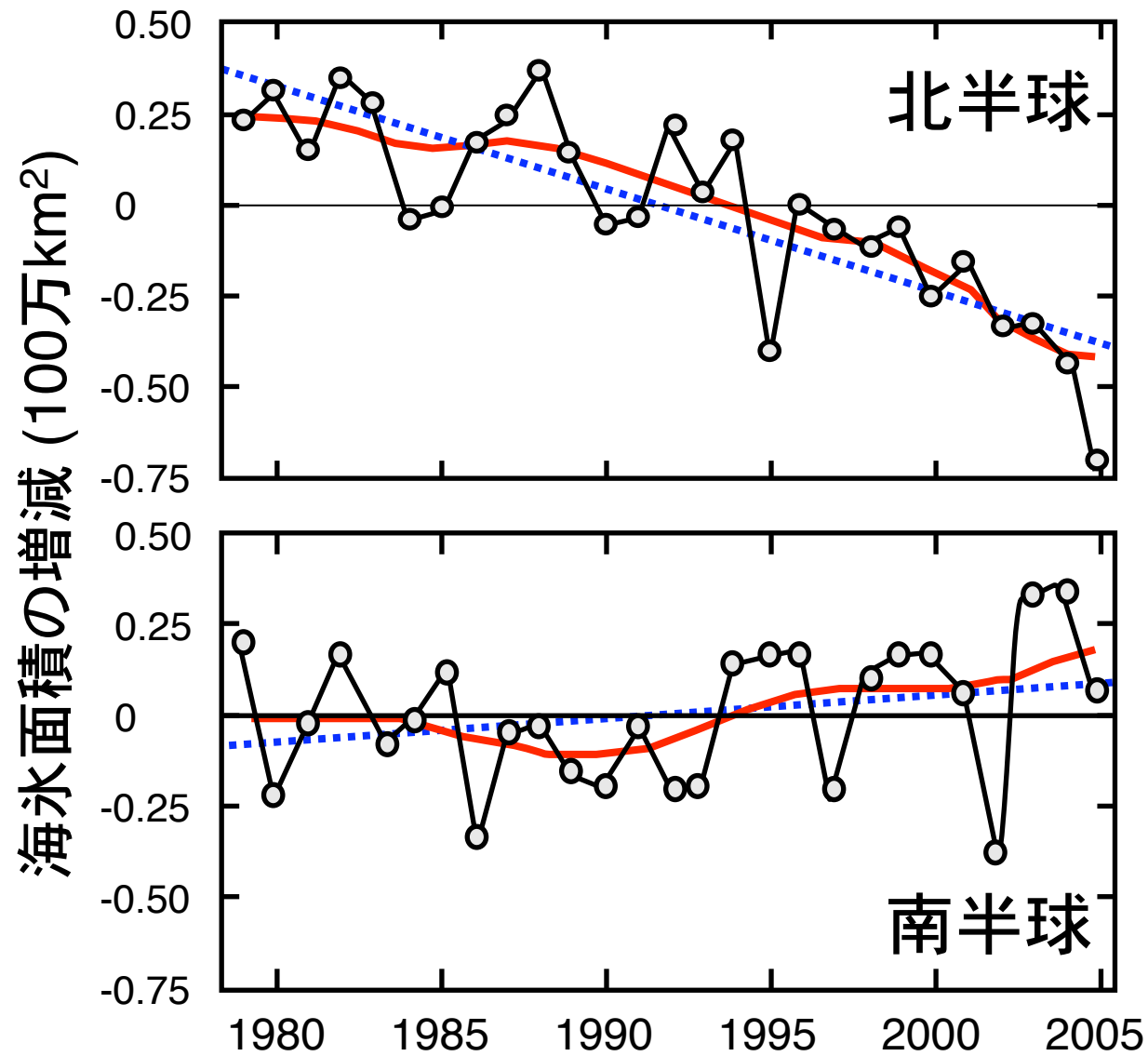


山岳氷河の変化





海氷の変化





世界の平均降水量

