

地球環境とリモートセンシング

— 大気の放射と地球環境 —

[2004.5.6]

高村民雄

環境リモートセンシング研究センター

APPOLO-17 で撮影 (1972) された地球



In 1972, Harrison H. Schmitt, a geologist and an astronaut, snapped this photograph from Apollo 17 while the space capsule orbited at a distance of 25,000 miles. Swirling clouds blanket part of snow- and ice-covered Antarctica, as well as parts of Africa and Asia, while sparkling blue oceans span the areas between the continents. Beyond the Red Sea, a great desert reaches across the Arabian Peninsula. At any moment clouds cover roughly half the earth's surface, reflecting some solar energy back into space while simultaneously trapping atmospheric heat.

PRECEDING PAGES:
Lightning strikes near northern California's Lava Beds National Monument.

地球の放射とは？ (I)

【生命存在の可能性をもたらす仕組みとは】



生命活動には快適な環境が必要



安定したエネルギー供給：太陽エネルギー
安定した資源：大気，水，...

★ 大気(環境)を支えるエネルギーの仕組み

地球の放射とは？ (II)

【エネルギーの伝達方法には】



顕熱輸送：媒体の直接移動によって運ぶ

高温物体→低温物体との混合

潜熱輸送：水の相変化によって運ぶ

水の蒸発による潜熱の獲得と凝結による放出

放射伝達：電磁波によって運ぶ

孤立した地球は、宇宙空間と熱の交換を放射のみによって行う

安定した地球の仕組み

$$\text{太陽受熱量 (1368W/m}^2\text{)} = \text{地球放出量}$$

地球が受ける太陽エネルギー

1章 太陽放射と地球放射

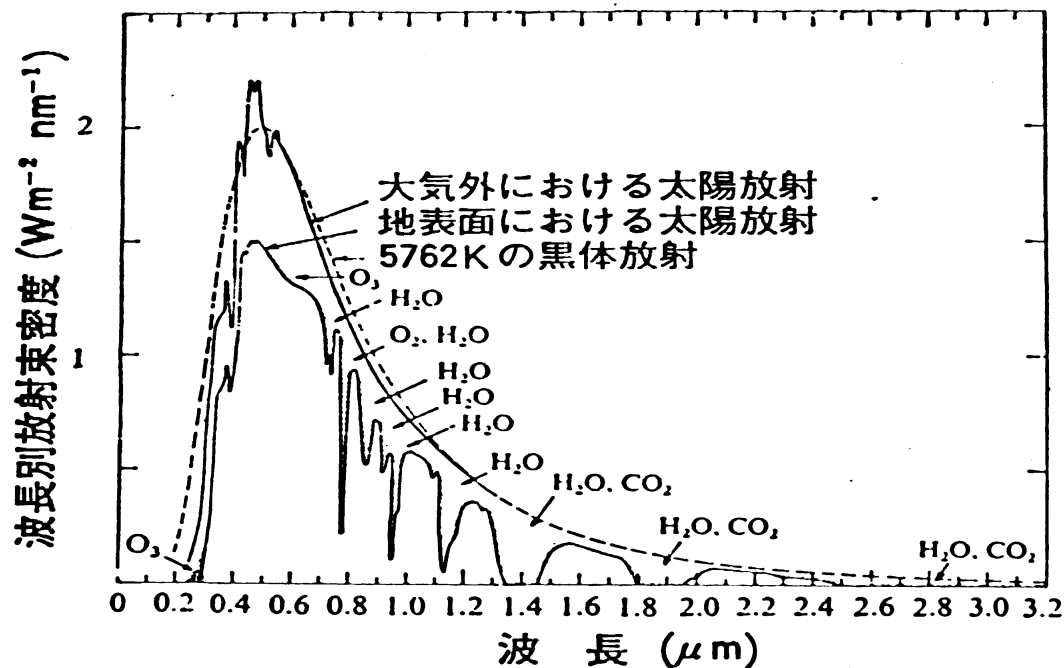


図 1.3 太陽放射のスペクトルとその変化。
影をつけた部分は、大気中の吸収物質による吸収を示す。この場合太陽の位置は天頂角 $=0$ にあるとしている (AFCRL, 1965)

安定した地球の仕組み

$$\text{太陽受熱量 (1368 W/m}^2\text{)} = \text{地球放出量}$$

黒体放射:

全ての物体はその温度に応じて放射を出す

地球も放射を出して、冷却している
=> 地球放射

黒体が出す放射のエネルギー

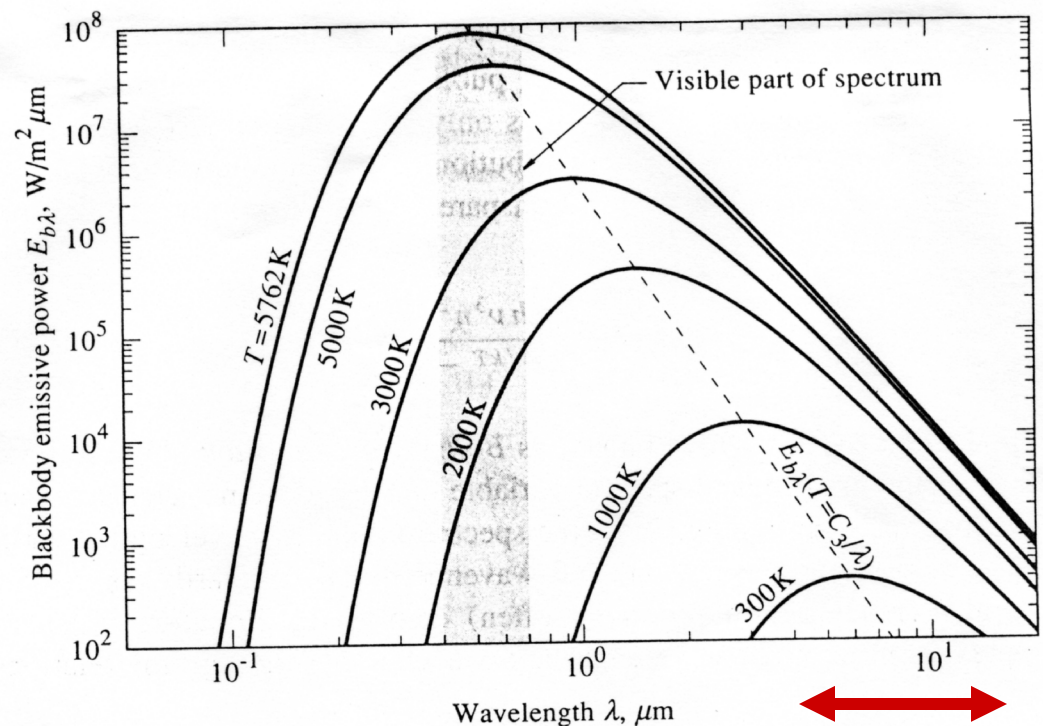


FIGURE 1-4
Blackbody emissive power spectrum.

M.F. Modest, 1993: Radiative Heat Transfer, McGraw-Hill Book Co.

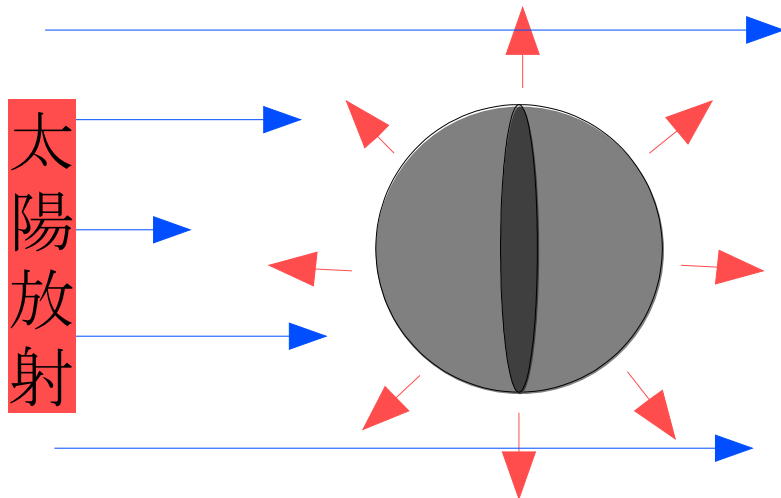
安定した地球の仕組み

太陽受熱量 (1368W/m^2) = 地球放出量



放射平衡:
宇宙から見た地球の等価黒体温度: 有効放射温度

地球の平均温度



$$(1-A)S_0 * \pi R^2 = \sigma T_e^4 * 4\pi R^2$$

A: アルベド (地球の平均の反射率)

S_0 : 太陽常数 ($=1368\text{W/m}^2$)

σ : Stefan-Boltzmann 常数

R: 地球半径

T_e : 有効放射温度

$$T_e = [(1-A)S_0 / (4\sigma)]^{1/4}$$

放射平衡による惑星の有効放射温度

	太陽からの距離	太陽 常数	アルベド	有効放 射温度	地表面温度	大気圧	炭酸ガス 量
	天文単位	W/m ²	A	T _e (K)	T _{srf} (K)	hPa	%
金星	0.72	2639	0.77	227	750	90000	98
地球	1	1368	0.3	255	288	1013	0.033
火星	1.52	592	0.15	217	240	7	95
木星	5.2	50.6	0.58	98	134 (雲頂)	---	---

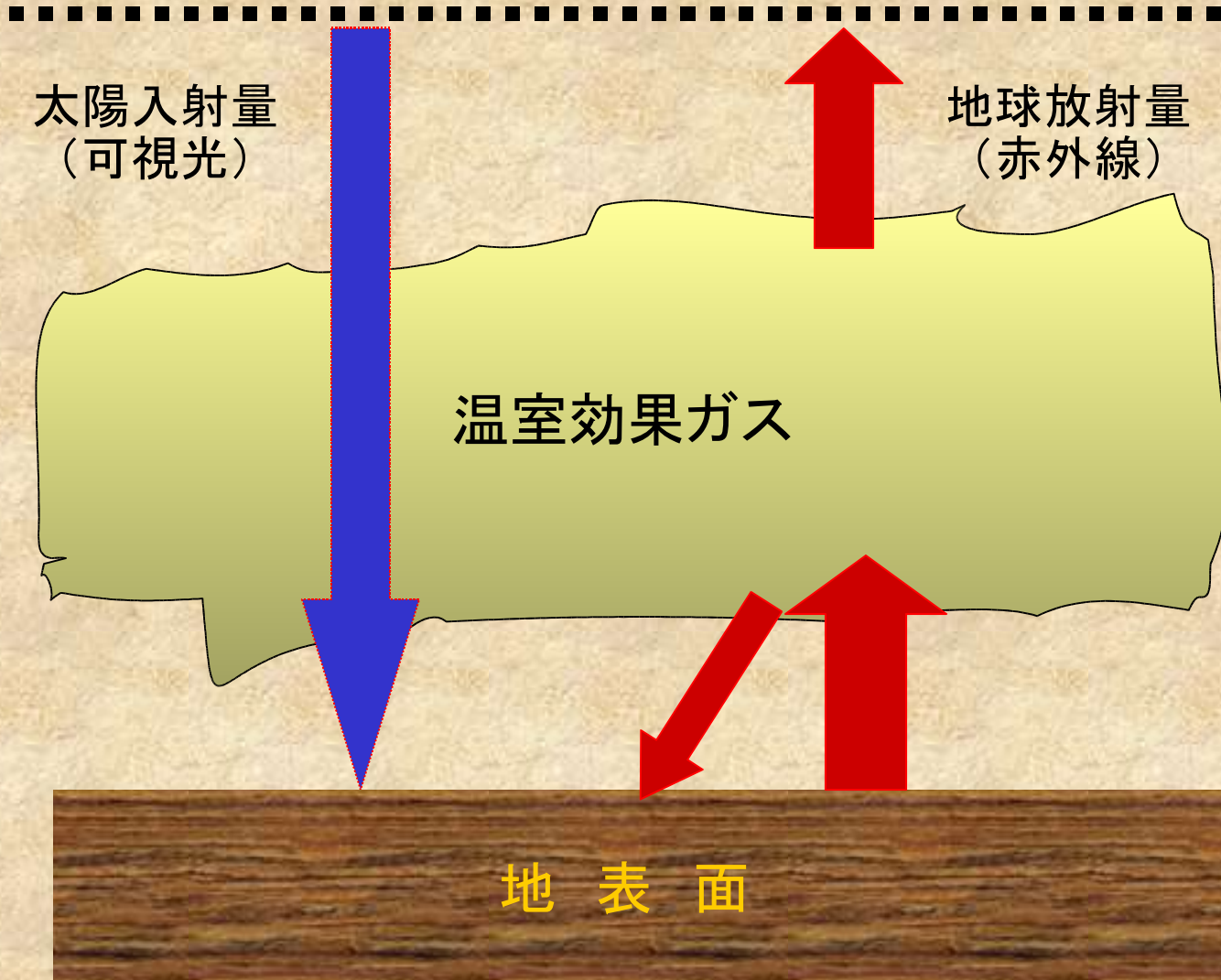
太陽入射量＝地球放射量

太陽入射量
(可視光)

地球放射量
(赤外線)

温室効果ガス

地 表 面



太陽スペクトルと大気の吸収

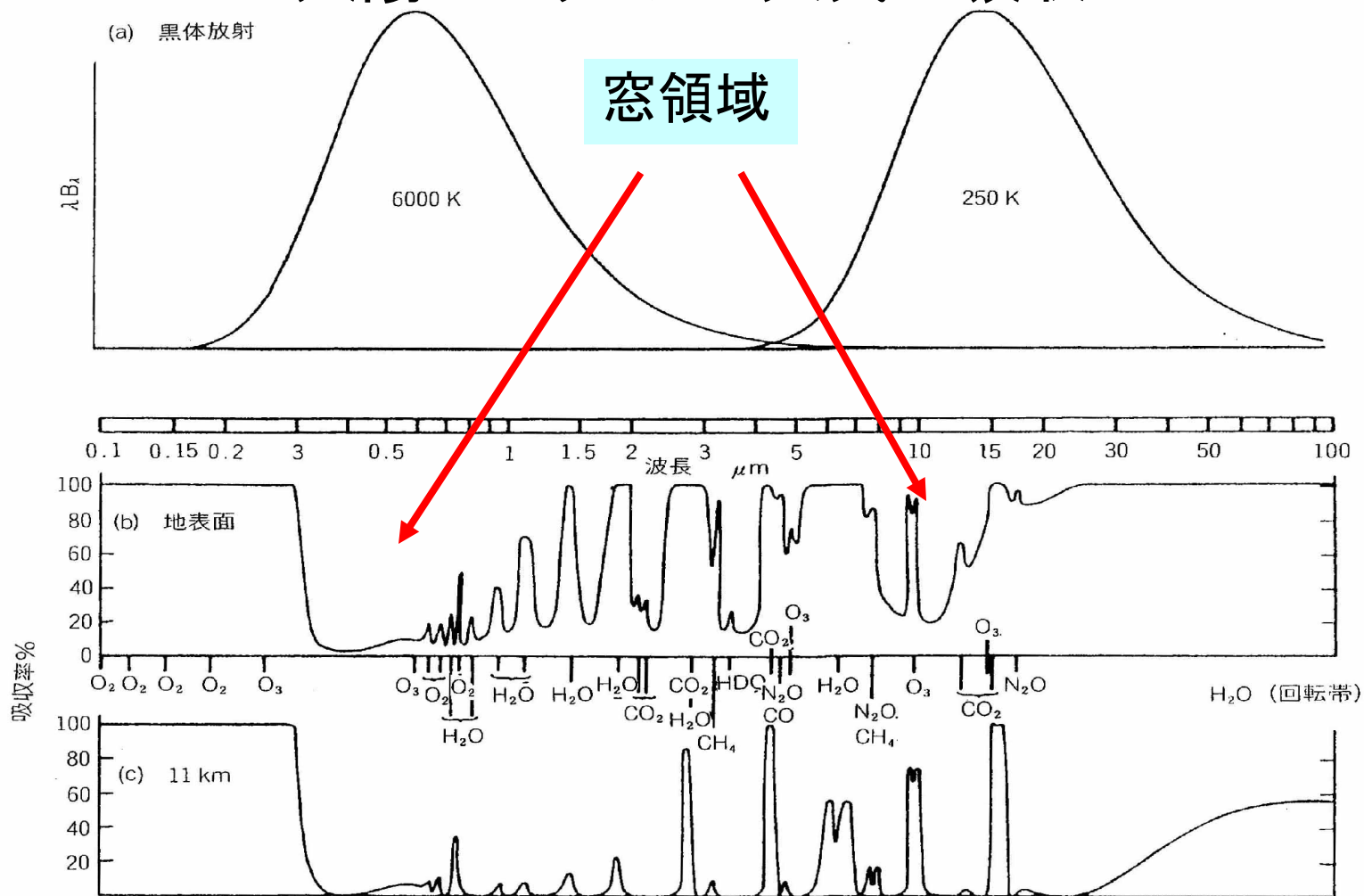


図 2.1.5 6000K と250K の黒体放射スペクトル(a)と気体の吸収帯構造(b) (Goody and Yung, 1989).

CO₂ 濃度の年変動傾向

4.3 放射伝達と気温

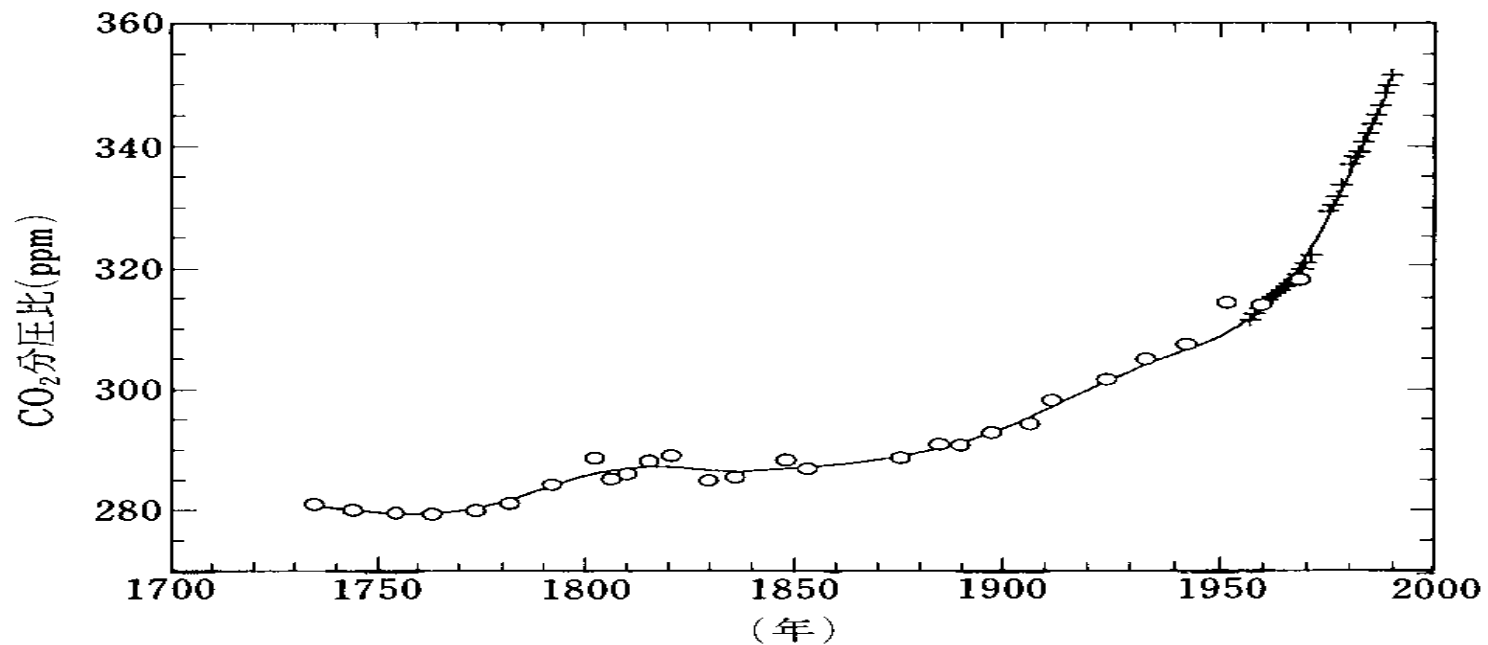


図 4.12 南極の空気の CO₂ 濃度の増加 (中澤, 1993)
南極 H-15 氷床コアに含まれる空気を抽出・分析した値 (○印) と, 南極点における観測値 (+印). 1ppm = 10⁻⁶

CO₂ 濃度の変動傾向

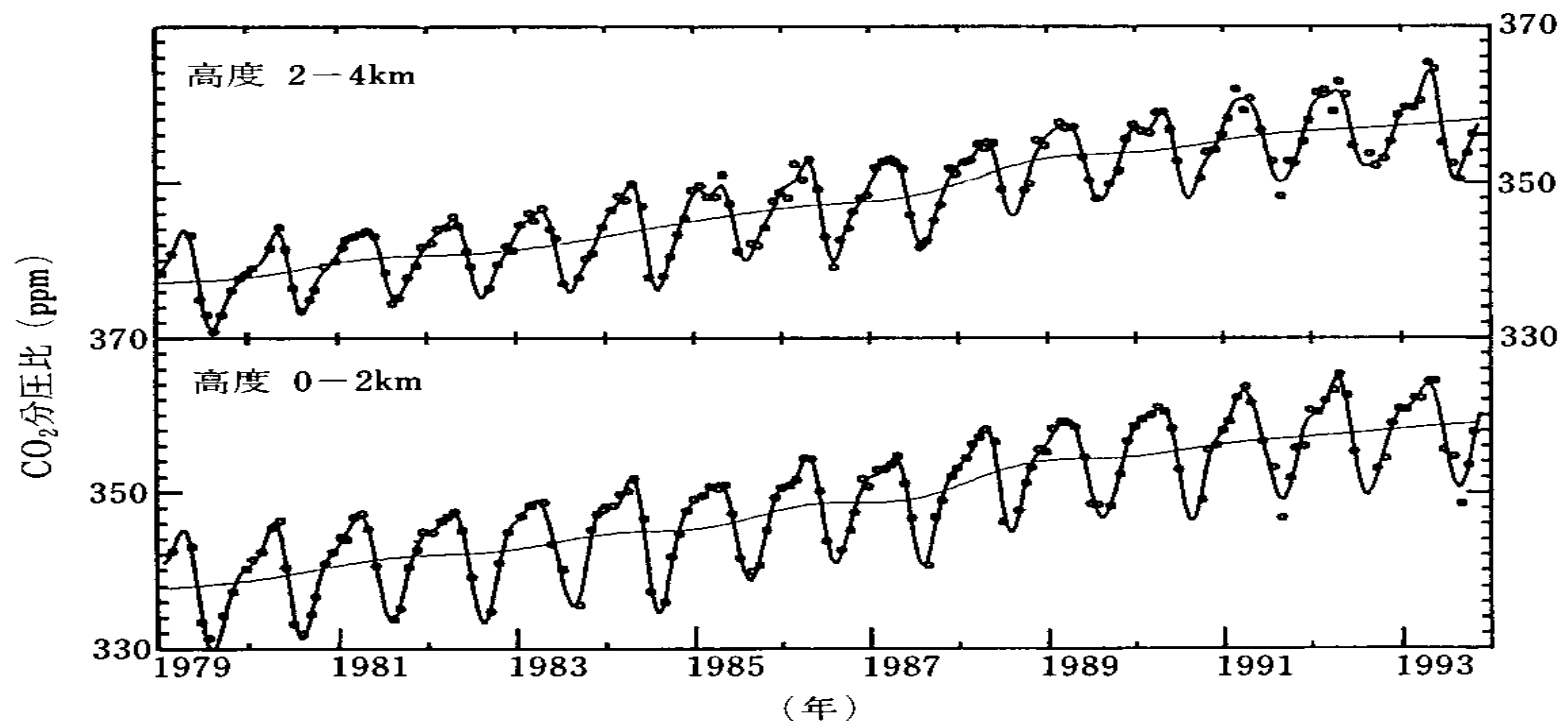


図 4.13 森林近くの CO₂ 濃度の変化 (中澤, 1993)
宮城県松川浦沖の測定値。細い実線は季節変化をとり除いた値。測定率を示す目盛り線が各年の 1 月 1 日。

暴走温室効果

水蒸気の増加と、その温室効果による昇温で飽和水蒸気圧が急速に上昇して、凝結が起こらなくなる状態。

加速度的に温室効果が促進される。



水の散逸と
乾燥化

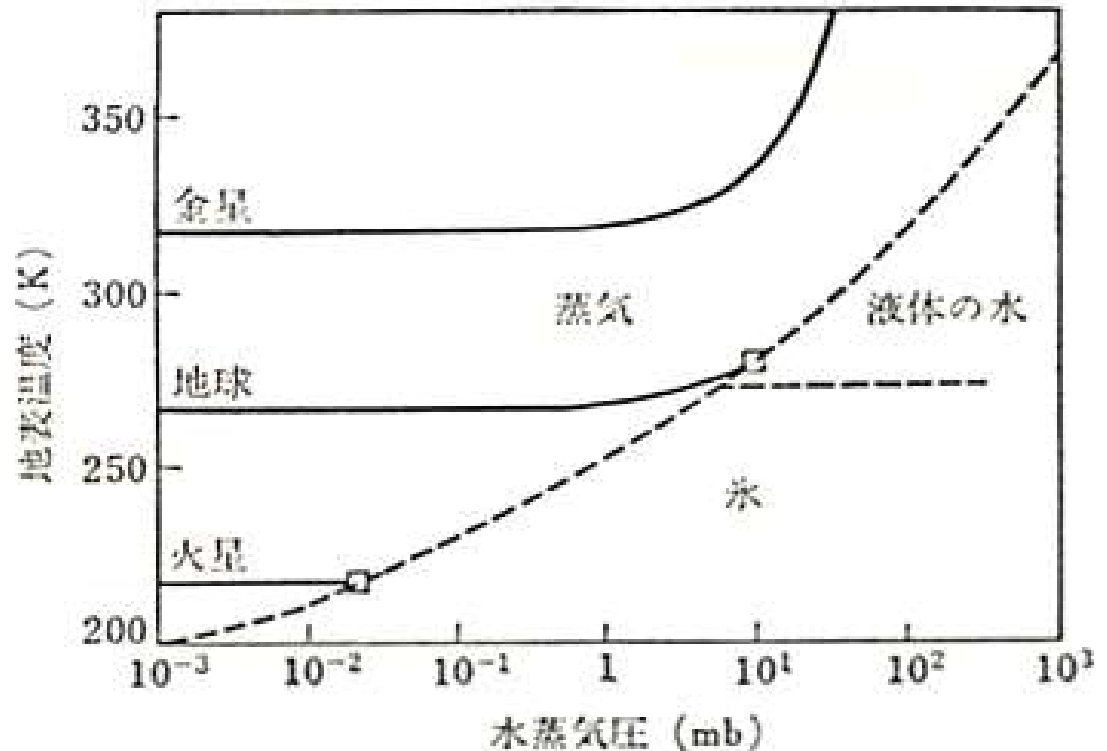


図 1.10 暴走温室効果と惑星大気の進化
(Rasool and DeBergh, 1970)

実線の曲線は、地球型惑星の大気中に水蒸気が蓄積されるにつれて、地表温度が温室効果によりどのように上昇するかを示す。火星と地球では、水蒸気圧が飽和水蒸気圧(破線)に等しくなると温度上昇は止まり、凍結か凝結が生ずる。金星は太陽に近いので高温であり、水蒸気はけっして飽和しない。

$$100(\text{入射量}) - 31(\text{反射量}) = 69(\text{赤外放出量})$$

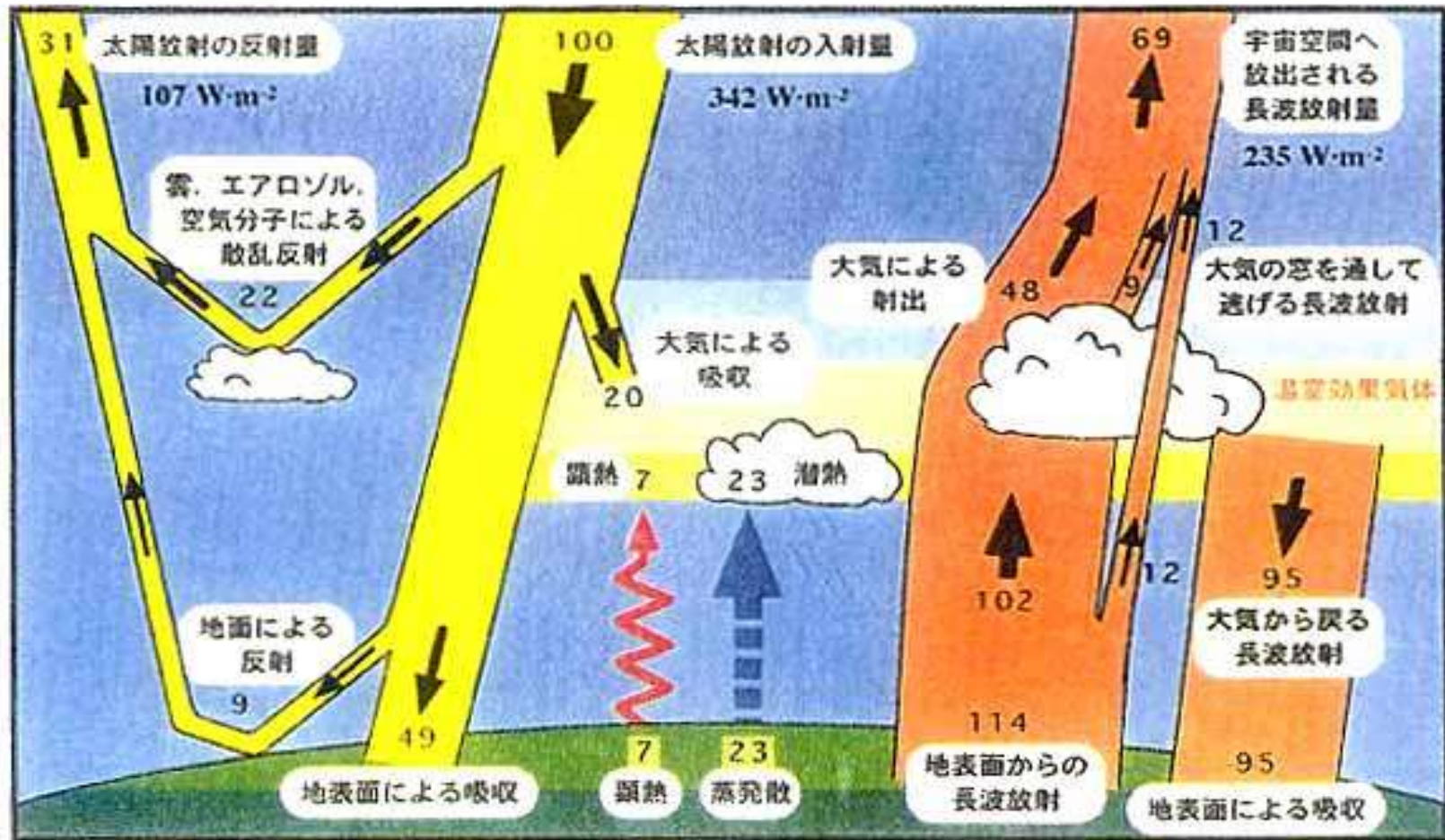


図2.2 大気と地表面における年平均したエネルギー収支

地球に入射する太陽放射エネルギー 342 W/m^2 に対する相対値 (%) (IPCC, 1996)。

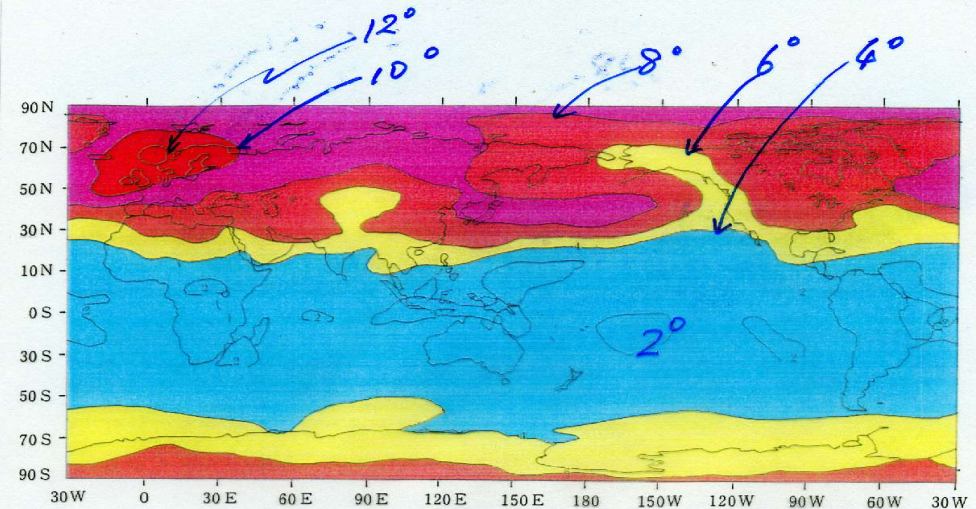
温暖化はなぜ悪い？

炭酸ガス倍増
モデルによる
温度増加

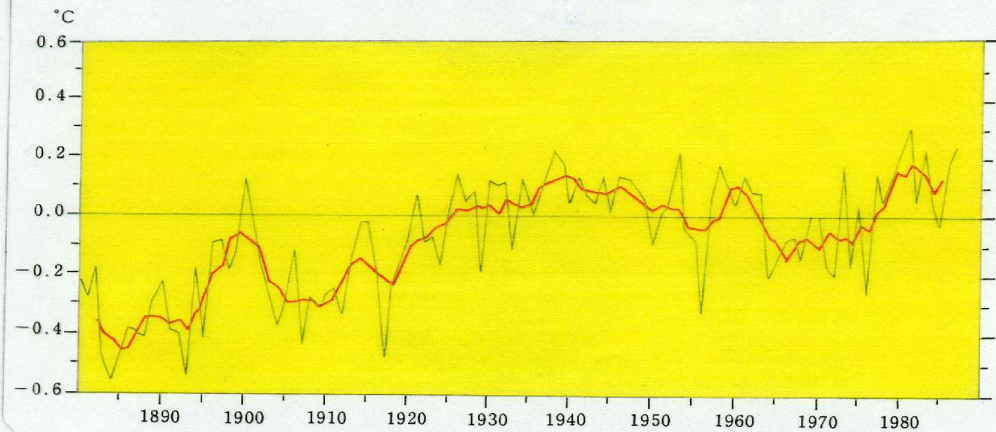
過去100年の
温度の変動

自然変化？

人為影響？



気象庁気象研究所大気・海洋混合層モデルによって得られた、
二酸化炭素2倍増に伴う年平均気温の上昇量(°C)



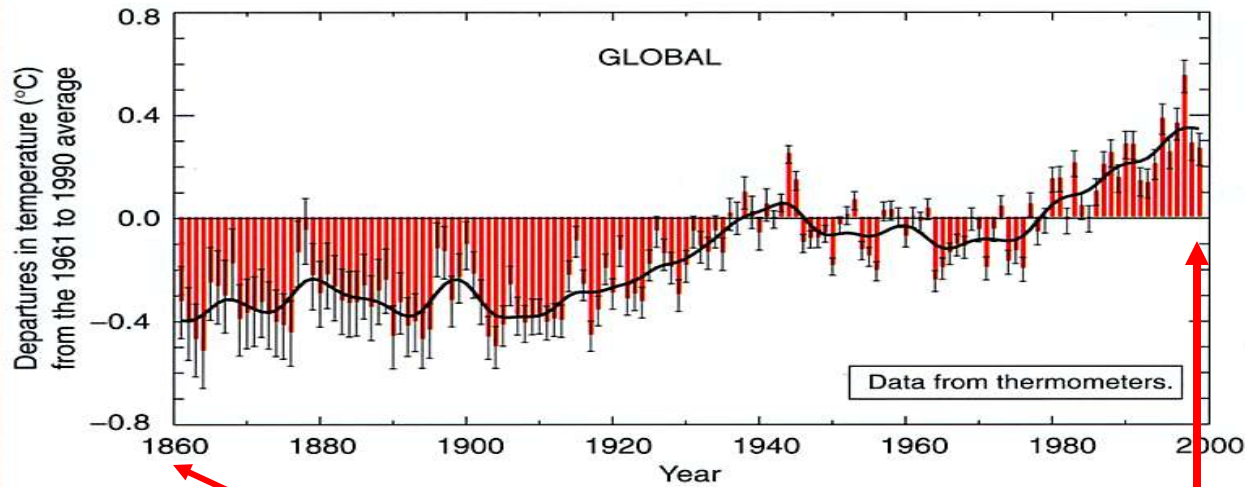
全球平均地上気温の経年変化図(°C)

平年値(1951～1980年の平均値)からの偏差を示す。

黒は年平均値、赤は5年移動平均値を示す。

Variations of the Earth's surface temperature for:

(a) the past 140 years



(b) the past 1,000 years

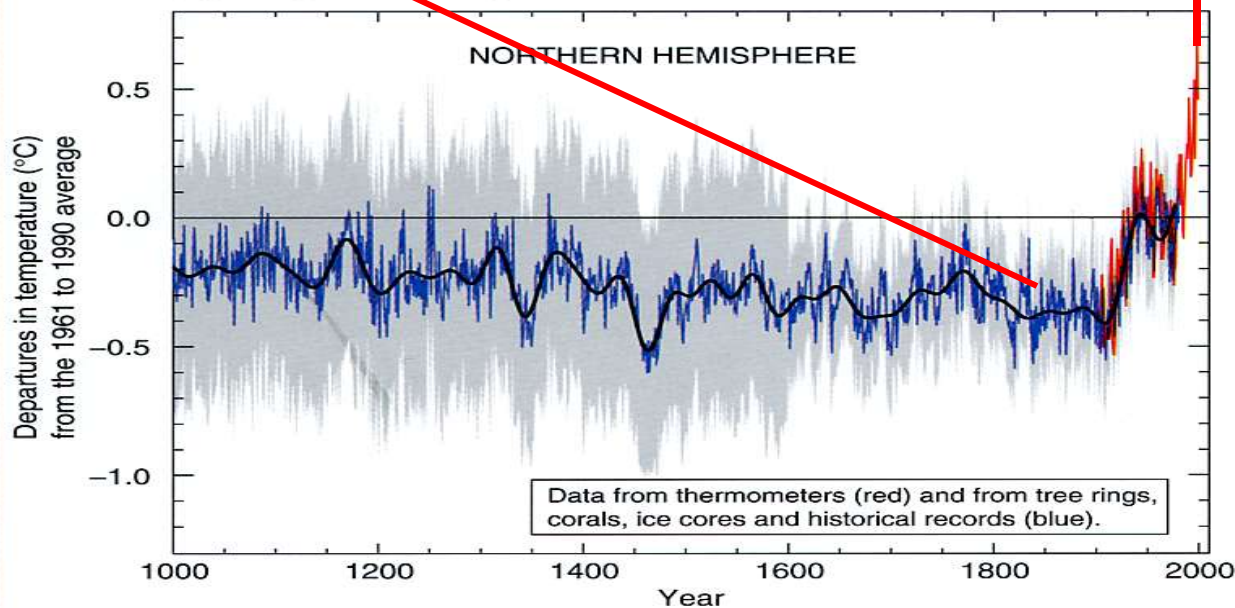


Figure 1: Variations of the Earth's surface temperature over the last 140 years and the last millennium.

(a) The Earth's surface temperature is shown year by year (red bars) and approximately decade by decade (black line, a filtered annual curve suppressing fluctuations below near decadal time-scales). There are uncertainties in the annual data (thin black whisker bars represent the 95% confidence range) due to data gaps, random instrumental errors and uncertainties, uncertainties in bias corrections in the ocean surface temperature data and also in adjustments for urbanisation over the land. Over both the last 140 years and 100 years, the best estimate is that the global average surface temperature has increased by $0.6 \pm 0.2^\circ\text{C}$.

(b) Additionally, the year by year (blue curve) and 50 year average (black curve) variations of the average surface temperature of the Northern Hemisphere for the past 1000 years have been reconstructed from "proxy" data calibrated against thermometer data (see list of the main proxy data in the diagram). The 95% confidence range in the annual data is represented by the grey region. These uncertainties increase in more distant times and are always much larger than in the instrumental record due to the use of relatively sparse proxy data. Nevertheless the rate and duration of warming of the 20th century has been much greater than in any of the previous nine centuries. Similarly, it is likely⁷ that the 1990s have been the warmest decade and 1998 the warmest year of the millennium.

[Based upon (a) Chapter 2, Figure 2.7c and (b) Chapter 2, Figure 2.20]

温暖化により予想される環境変化

功罪:

★ 寒冷域の減少と熱帯域, 温帯域の増大

一> 可耕地の増大による穀物生産の拡大

一> 極域(シベリア)の地中メタンの放出 => 温暖化の加速

一> 可住地の拡大(?)

一> 病害虫への耐性

★ 水循環の変動

一> 気候帯の変動による耕作物の対応の可能性

一> 種の多様性の維持の可能性

一> 極域陸氷の融解による海面上昇

★ 異常気象の頻発

一> 災害の発生

一> 気候変動

温室効果を抑制するもの

太陽入射量＝地球放射量

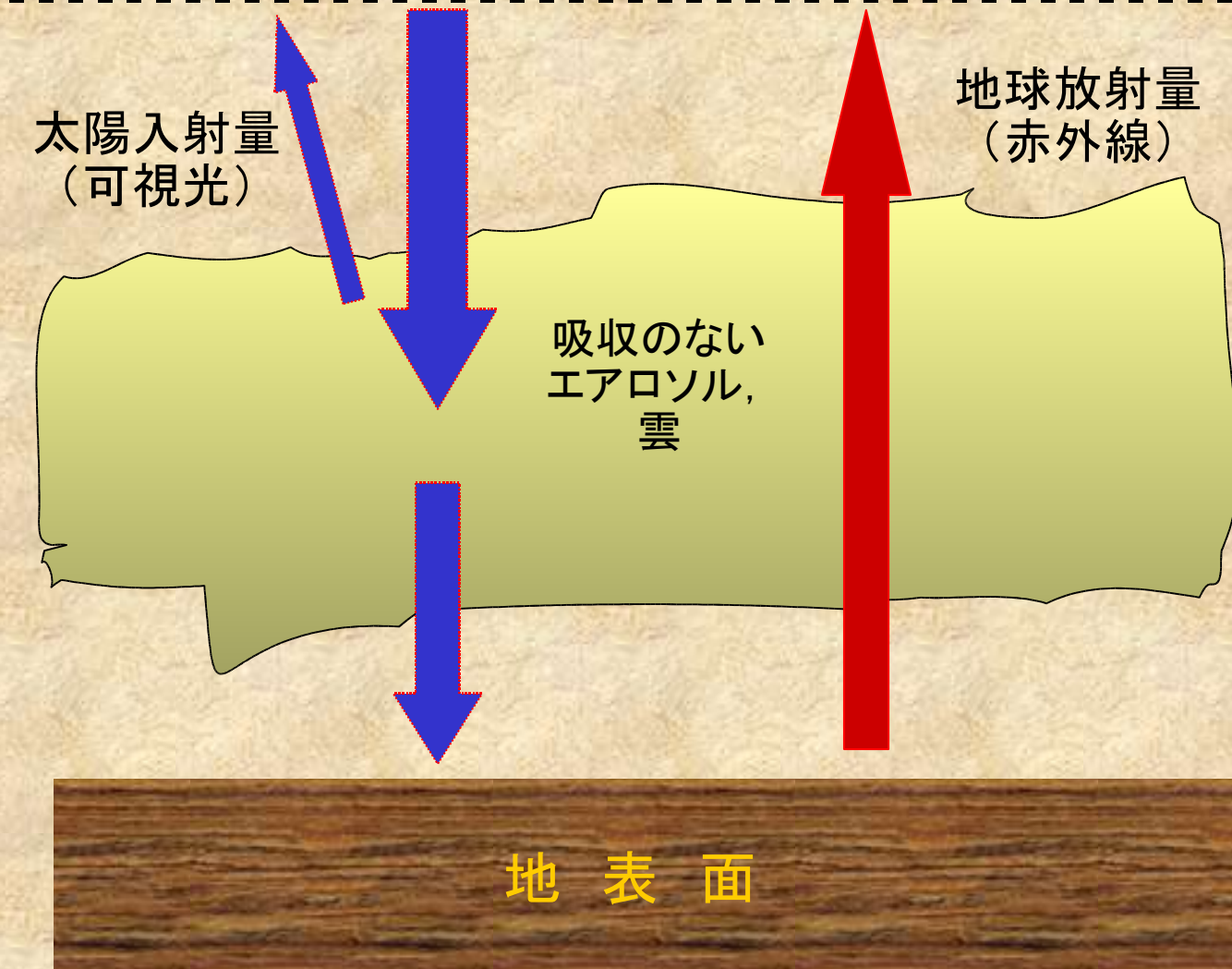
大気上端

太陽入射量
(可視光)

地球放射量
(赤外線)

吸収のない
エアロソル,
雲

地 表 面

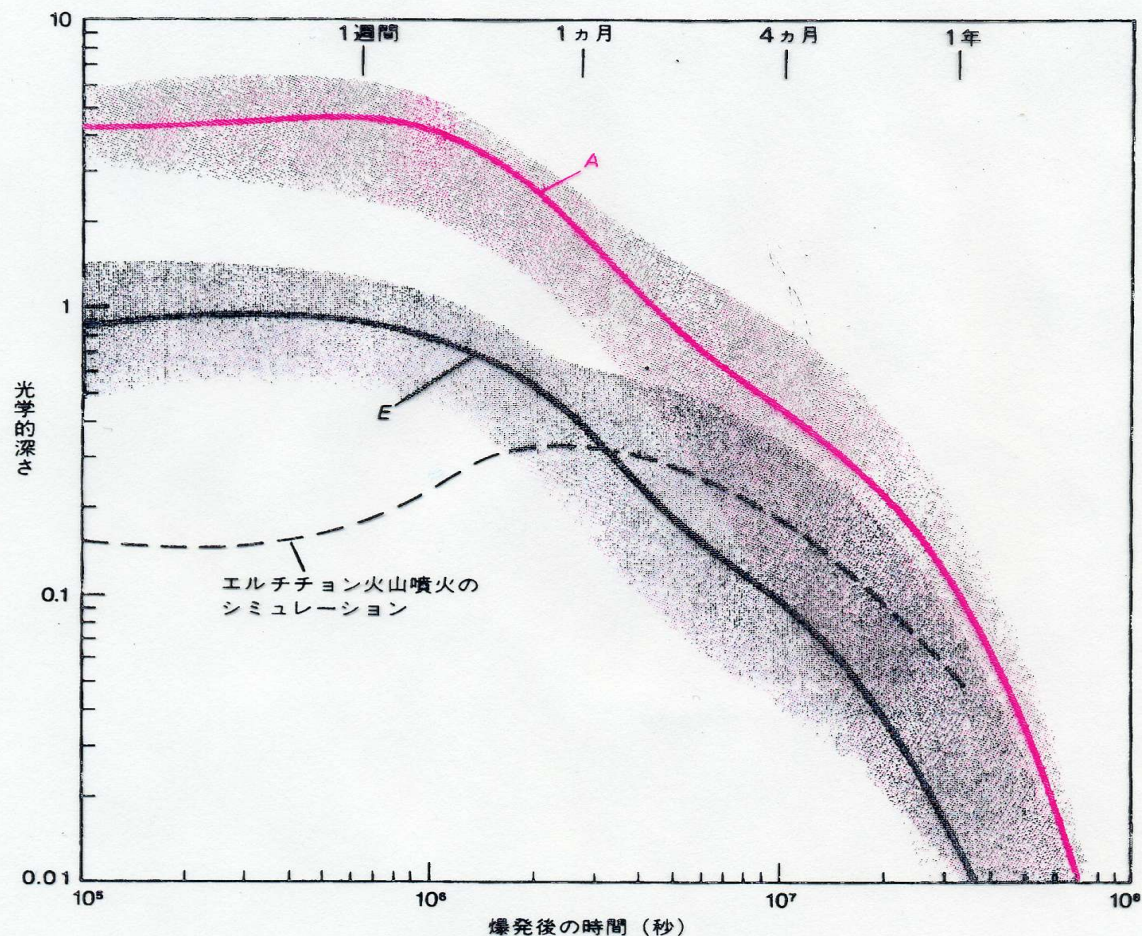




Pinatubo caldera eight months later

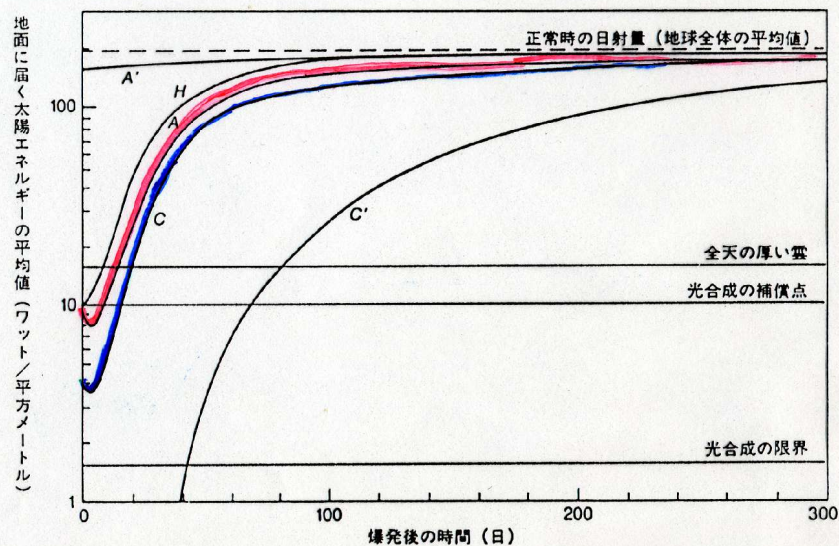
核の冬

5000Mt 核爆発時の
粉塵と煙による大気
の汚れが引き起こす
気候影響



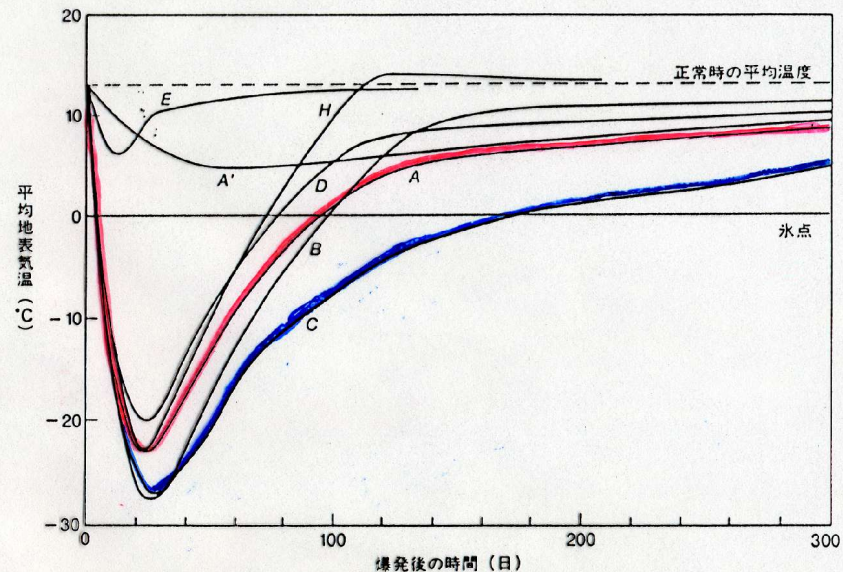
不透明度の時間変化 核戦争でできる煙と塵の雲の、不透明度の時間変化を示した図。ここでは、不透明度を表わす尺度として、雲の光学的深さ（北半球の平均値）を採用している。光学的深さは可視光の550nm（1nmは 10^{-9} m）の波長に対して計算した。結果は、2種類の帯域に分かれる傾向がある。上部の帯域には、総爆発力5000Mtの基準シナリオ（赤線）と、それによく似た100～1万Mtの核戦争の結果が含まれている。下部の帯域は、それほど激しくない結果をもたらすシナリオからなっている。この帯域に含まれるシナリオには、1000Mtの限定応酬（黒色の実線）や軍事目標だけを狙う3000Mtの対兵力攻撃などがある。光学的深さの平均値が1より大きくなれば、必ず破壊的な気候の変化が生じることが予想される。1982年のエルチチョン火山の噴火で噴き上げられた塵の雲の光学的深さ（北半球の平均値）を、比較のために破線で示してある。

粉塵による大気の汚れと 地上に届く平均日射量



地面に達する太陽エネルギーの時間変化 核戦争でできる煙と塵の雲を通過して、地面に達する太陽エネルギー量の時間変化を示してある。各曲線は、地表での太陽エネルギー量（北半球の平均値）を示す。エネルギー量は、水平方向に一樣に分布した煙の雲（斑点状になる可能性があるが、それは考慮に入っていない）による減衰を基に計算した。曲線A（赤色）は5000Mtの基準シナリオの結果、曲線Bは基準シナリオの変形で、塵の影響だけを考慮に入れた場合の結果である。曲線Cは1万Mtの全面応酬シナリオの変形で、煙の放出に関係するパラメーターに最大値を代入した結果である。参考のために、典型的な植物の光合成補償点（植物が光合成によって二酸化炭素を取り込む速さと、呼吸によって二酸化炭素を放出する速さが等しくなるエネルギーレベル。植物の生活維持に必要な最低のエネルギー条件）と、光合成が停止するエネルギーレベルも示した。この2つの限界値は、植物によってかなり違う。

日射量減少に伴う地表 温度の低下と変動

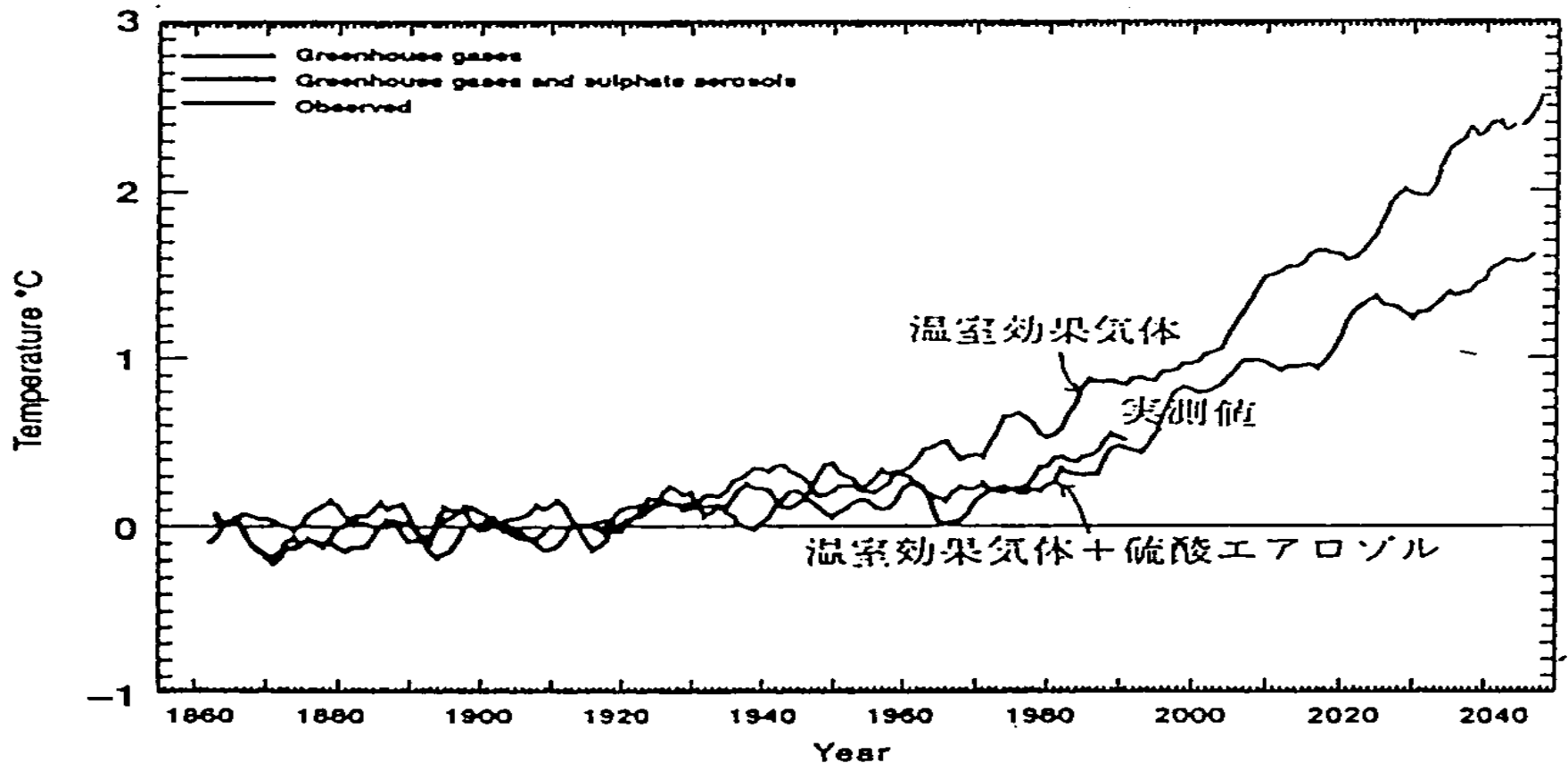


地表温度の時間変化 シナリオの一部の例について、核戦争後の北半球で地表温度がどのように変化するかを調べた。赤色の曲線Aは基準シナリオの結果である。対流圏（12km以下）の煙は、ふつう短期的であるが、大きい冷却効果をもつ。一方、成層圏（12km以上）の塵は、煙ほど明確ではないが、長期の冷却傾向を生じさせる。各シナリオに対する温度降下の平均値は、予測される最大値となっている。したがって、ここで示した温度降下がみられるのは、大陸の内陸域だけだろう。海洋上の温度降下は、わずか2～3℃以内である。そのため、陸上と海上の空気の混合が起こり、沿岸付近の陸上ではそれほど厳しい温度降下は生じない。しかし、この混合現象のために、沿岸付近は長期間激しいあらしに見舞われることになる。この図に示した温度は季節平均値である。戦争が夏にあれば、温度降下はここに示した値より大きくなる。戦争が冬にあれば、逆に小さくなる。温度がわずか2～3℃下がるだけでも、農業に深刻な悪影響を及ぼす。

地表面温度変動予測

(炭酸ガスとエアロソルの効果)

Predicted (1860-2050) and Observed (1860-Present Day)
Surface Air Temperature changes (°C)



The global climate of the 21st century

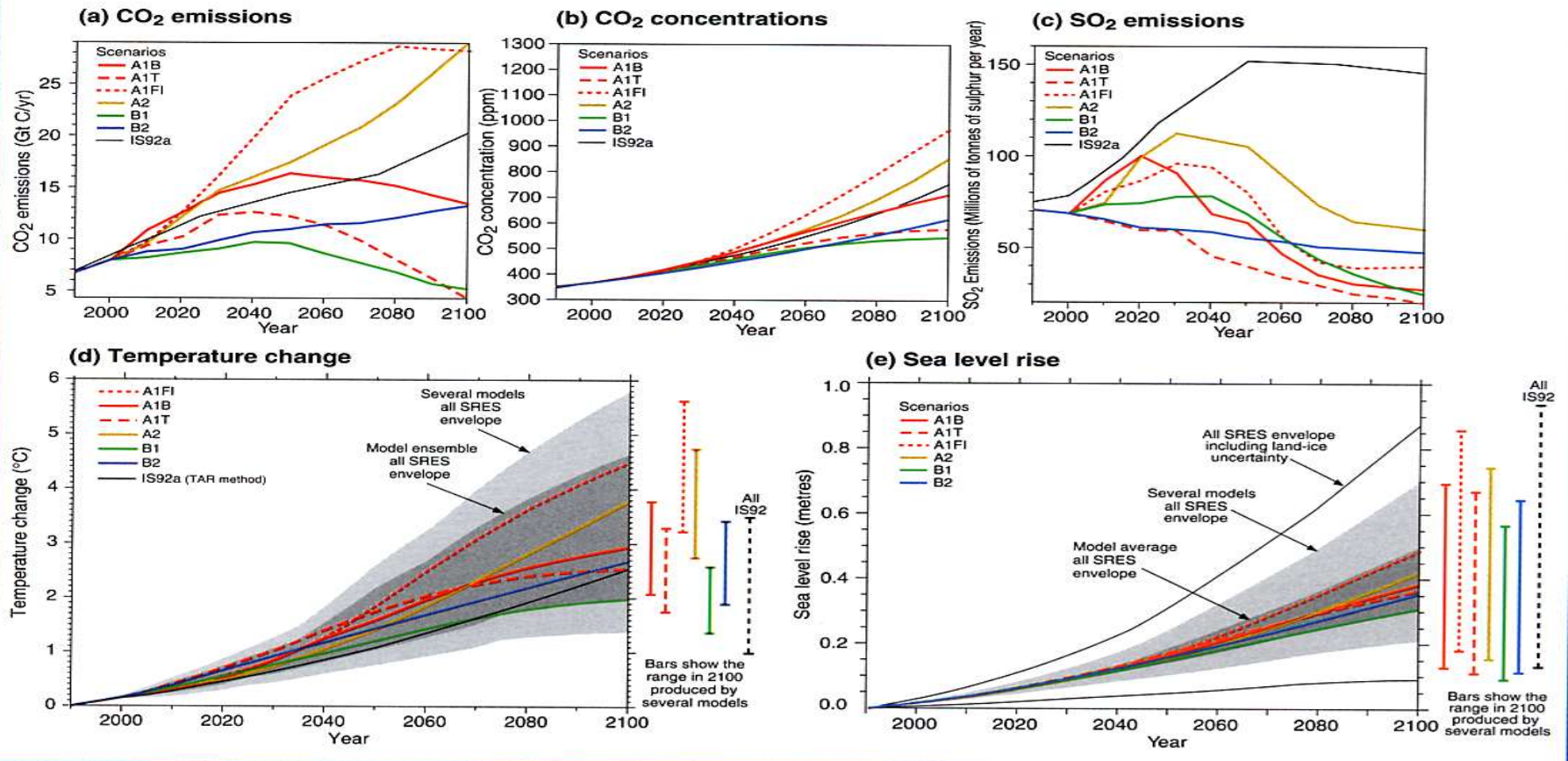


Figure 5: The global climate of the 21st century will depend on natural changes and the response of the climate system to human activities.

Climate models project the response of many climate variables – such as increases in global surface temperature and sea level – to various scenarios of greenhouse gas and other human-related emissions. (a) shows the CO₂ emissions of the six illustrative SRES scenarios, which are summarised in the box on page 18, along with IS92a for comparison purposes with the SAR. (b) shows projected CO₂ concentrations. (c) shows anthropogenic SO₂ emissions. Emissions of other gases and other aerosols were included in the model but are not shown in the figure. (d) and (e) show the projected temperature and sea level responses, respectively. The “several models all SRES envelope” in (d) and (e) shows the temperature and sea level rise, respectively, for the simple model when tuned to a number of complex models with a range of climate sensitivities. All SRES envelopes refer to the full range of 35 SRES scenarios. The “model average all SRES envelope” shows the average from these models for the range of scenarios. Note that the warming and sea level rise from these emissions would continue well beyond 2100. Also note that this range does not allow for uncertainty relating to ice dynamical changes in the West Antarctic ice sheet, nor does it account for uncertainties in projecting non-sulphate aerosols and greenhouse gas concentrations. [Based upon (a) Chapter 3, Figure 3.12, (b) Chapter 3, Figure 3.12, (c) Chapter 5, Figure 5.13, (d) Chapter 9, Figure 9.14, (e) Chapter 11, Figure 11.12, Appendix II]

The global mean radiative forcing of the climate system for the year 2000, relative to 1750

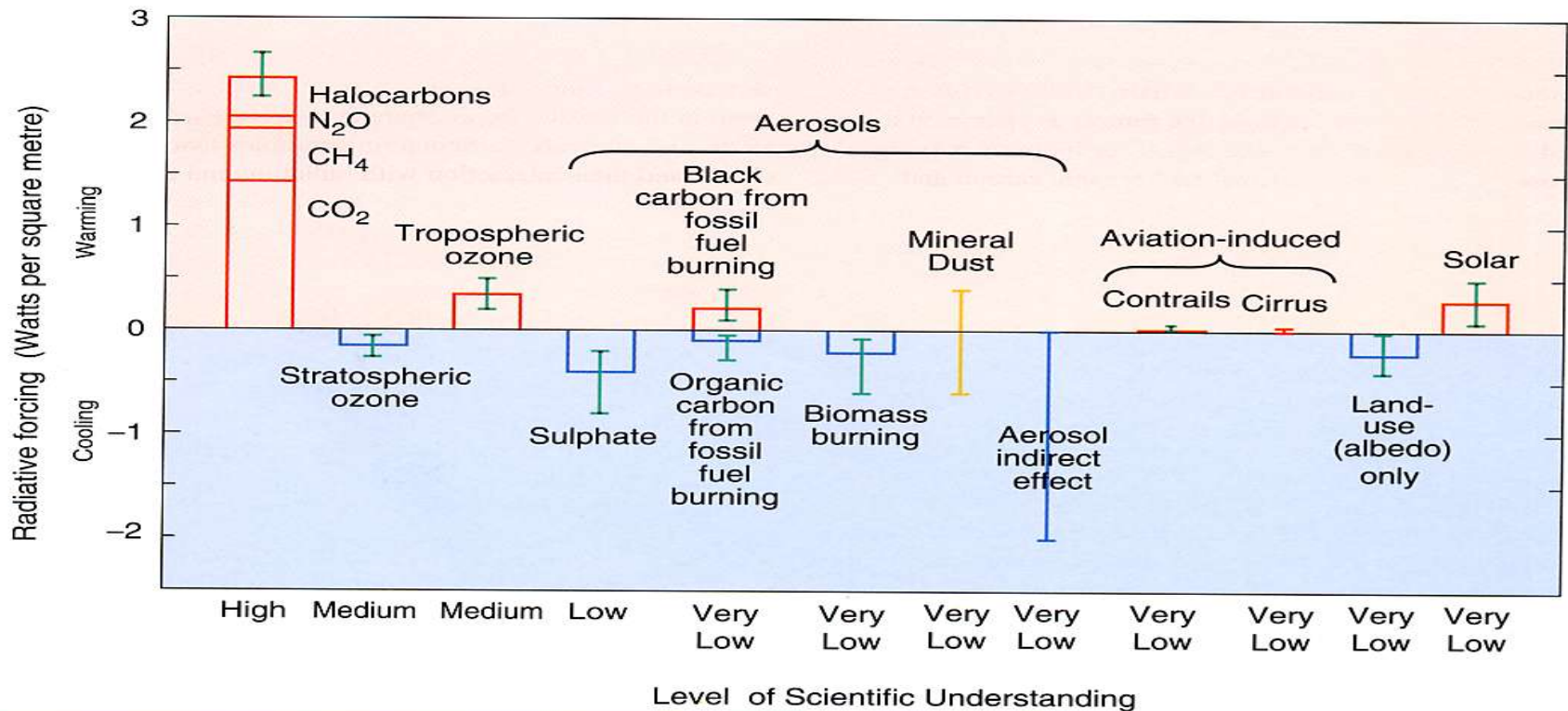


Figure 3: Many external factors force climate change.

These radiative forcings arise from changes in the atmospheric composition, alteration of surface reflectance by land use, and variation in the output of the sun. Except for solar variation, some form of human activity is linked to each. The rectangular bars represent estimates of the contributions of these forcings – some of which yield warming, and some cooling. Forcing due to episodic volcanic events, which lead to a negative forcing lasting only for a few years, is not shown. The indirect effect of aerosols shown is their effect on the size and number of cloud droplets. A second indirect effect of aerosols on clouds, namely their effect on cloud lifetime, which would also lead to a negative forcing, is not shown. Effects of aviation on the spread in the published values of the forcings and physical uncertainties. Some of the forcings possess a much greater degree of certainty than others. A vertical line without a rectangular bar denotes a forcing for which no best estimate can be given owing to large uncertainties. The overall level of scientific understanding for each forcing varies considerably, as noted. Some of the radiative forcing agents are well mixed over the globe, such as CO₂, thereby perturbing the global heat balance. Others represent perturbations with stronger regional signatures because of their spatial distribution, such as aerosols. For this and other reasons, a simple sum of the positive and negative bars cannot be expected to yield the net effect on the climate system. The simulations of this assessment report (for example, Figure 5) indicate that the estimated net effect of these perturbations is to have warmed the global climate since 1750. [Based upon Chapter 6, Figure 6.6]