

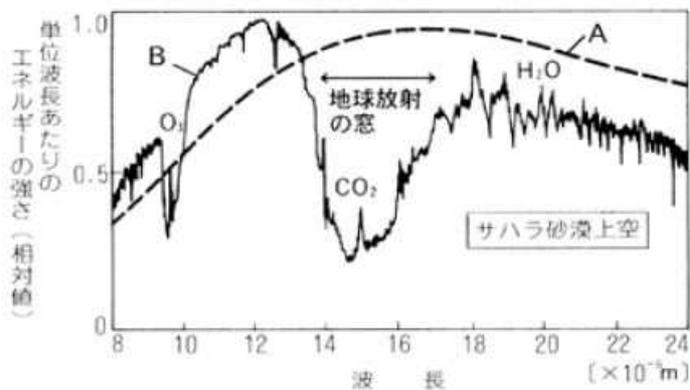
■ 啓林館理科総合 B 改訂版

これは教科書ではなく、啓林館『ユーザーの広場』の理科総合 B 改訂版のページに記載されている内容です。まず問題の記述部分を示します。

第 1 節 大気と地球の熱収支

◆地球放射

太陽放射で暖められた地球は、平均 15°C になり、この温度の赤外放射をしている。各波長別の強度は下図のようになる。赤外線を主体とする地球放射のある波長領域は、大気中の水蒸気や二酸化炭素によってほとんど吸収される。そのため、実際に大気を通り抜けて宇宙空間に放出されるのは、吸収を免れた部分だけである。この領域を地球放射の窓という。



▲ 地球放射の波長別強度分布

A : 300 K の物体の放射エネルギー

B : 大気中で吸収されるエネルギー

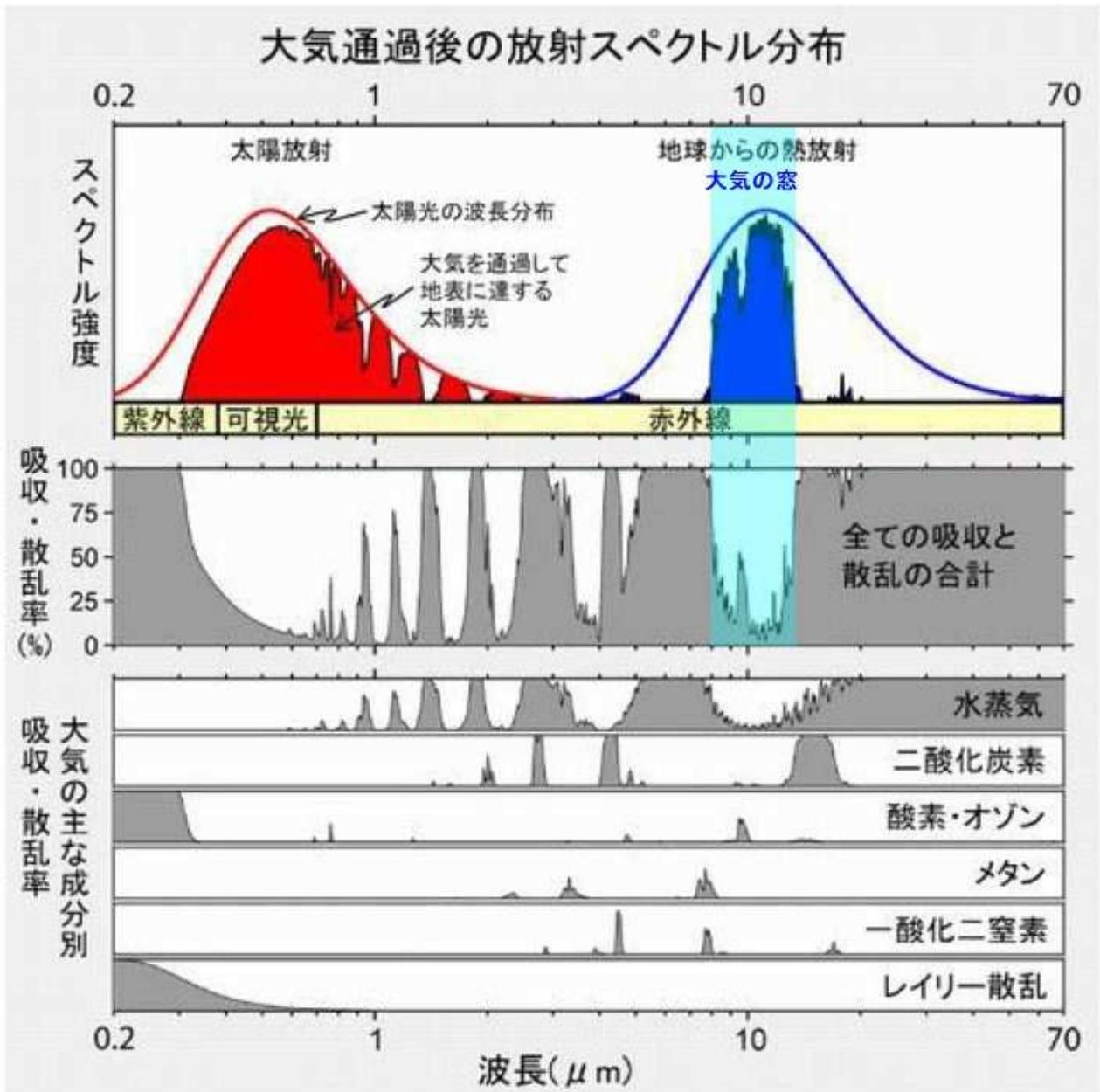
解説:

上の図は、地球観測衛星からサハラ砂漠上空の電磁波を観測したパワースペクトル(周波数ごとに含んでいるエネルギーをグラフにしたもの)です。観測衛星の軌道高度は Nimbus であれば地上数 100 km の宇宙空間からの観測結果です。つまり観測されているパワースペクトルは、地表面からの赤外線放射と対流圏上層からの低温赤外線放射の両方を含んだ地球からの赤外線放射のすべてを示しています。

まず上の図はかなり特殊な地球放射のパワースペクトルです。観測地はサハラ砂漠上空です。砂漠の大気は極めて乾燥しており、しかも観測を行った日の天候は、おそらく快晴と考えてよいでしょう。

次図に、平均的な晴天日の地球大気の電磁波に対する吸収特性を示します。太陽放射とは、温度 6000 K の太陽から放射される電磁波のパワースペクトルです。地球からの熱放射とは地球に吸収される有

効な太陽放射に対する放射平衡温度である温度 255K(−18°C)の物体から放射される電磁波のパワースペクトルです(→太陽放射と地球放射)。



WIKIMEDIA COMMONS File:Atmospheric Transmission JA.png の図を加工した図A

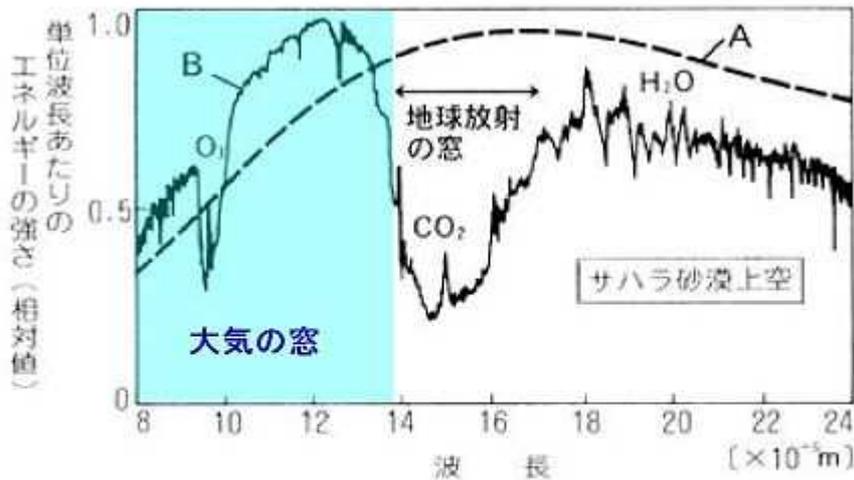
上図には、地球の下層大気を構成する主要な温室効果気体の吸収スペクトルが示されています。図から明らかなように、地球放射に対する温室効果の大部分が水蒸気であることがわかります。二酸化炭素は波長 15 μm 付近のごく狭い帯域について赤外線を吸収します。

図に薄い水色で着色した部分に対応する 8~12 μm 付近の波長帯域=『大気の窓』に対して、透明な地球大気は顕著な温室効果気体がなく、よく晴れた日には地球の表面からの放射は大気に捉えられずに直接宇宙空間に放射されます。これを放射冷却現象と呼びます。

水蒸気が多くて晴れていても空が白っぽく見える場合(水蒸気クラスター分子によるミー散乱→光の性

質)や雲に覆われた場合には大気の窓はふさがれてしまい、地球放射は完全に地球大気と雲に吸収されます。

地球からの放熱は、雲があれば雲頂と地球の対流圏上層付近の温室効果気体からの低温赤外線放射によって行なわれます。前述のとおり、大気が乾燥して透明度が高い場合には大気の窓などを通して地球表面からの赤外線放射の一部も放射冷却現象として地球の放熱に寄与しています。



▲ 地球放射の波長別強度分布

A : 300 K の物体の放射エネルギー

B : 大気中で吸収されるエネルギー

上図に示すサハラ砂漠では、大気は乾燥して透明であるために、薄い水色で示した B 部分の地球放射のスペクトルは地球の表面放射が大気の窓を通して直接宇宙空間に放射されている状況を地上数 100km の宇宙空間から観測衛星が捉えたものです。『大気中で吸収されるエネルギー』ではありません。ちなみに、B部のパワースペクトルは温度 320K (47°C) 程度の物体のパワースペクトルに近い分布であり、サハラ砂漠の表面温度が 50°C 程度であることを示しているのです(下の参考図を参照)。

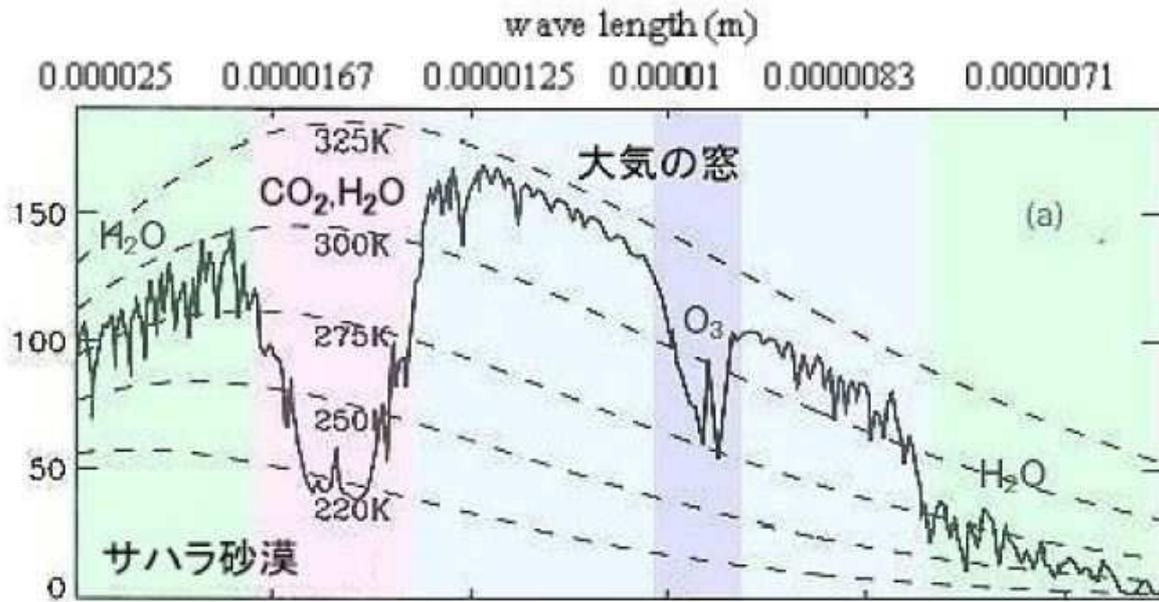
一方、原図で『地球放射の窓』と記されている範囲は二酸化炭素の吸収スペクトルに対応する帯域であり、大気の窓とはまったく関係がありません。この部分のパワースペクトルの分布は 220K 程度の物体からの赤外線放射のパワースペクトルに近い分布です。つまりこの部分是对流圏大気上層の 220K 程度の冷たい大気に含まれる二酸化炭素の低温赤外線放射を観測衛星が捉えているのです。サハラ砂漠の大気は乾燥大気(乾燥大気の温度減率を -10K/km とする)で近似できるとすれば、その高度は次のように推定できます(→下層大気の温度分布)。

$$H = (220K - 320K) / (-10K/km) = 10km$$

つまり、高度 10km 付近の対流圏上層から二酸化炭素が低温赤外線放射している状況を捉えたのが原図で『地球放射の窓』として記された部分のほんとうの意味です。

パワースペクトルの 16μm 以上の部分は、大気中の水蒸気濃度が低いために地球大気は地表面放射を完全に補足することができずに一部が直接宇宙空間に放出されているものと考えられます。

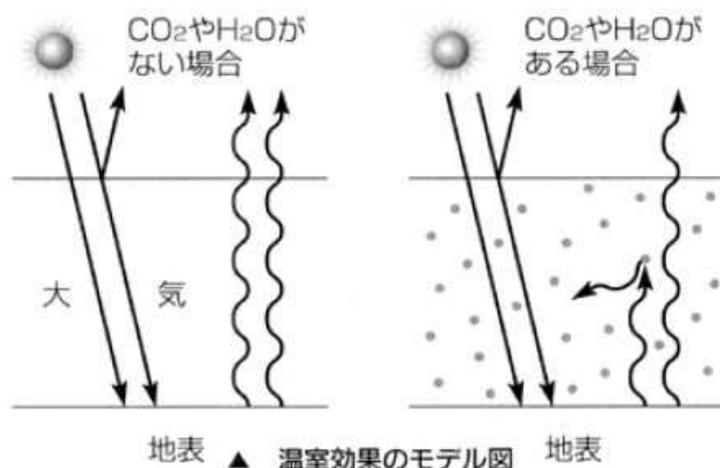
参考図を示しておきます。波長の座標軸の方向が逆転しているので注意してください。



次に、温室効果の説明におけるガラス温室の例による解説を検討します。

◆温室効果

地表から放射される赤外線のはほとんどは大気圏下層の水蒸気や二酸化炭素に吸収される。この赤外線を吸収して暖められた大気からも赤外放射が行われるが、その約3分の2は地表に戻って地表を暖めている。そのため地球の表面温度は高くなる。このように大気は可視光線を主体とする波長の短い太陽放射は通すが、赤外線を主体とする波長の長い地球放射はよく吸収するために、地球が大気圏外へ放出する熱を抑制して地球の気温を保つはたらきをする。これを大気の温室効果とよんでいる。



たとえば、温室の窓ガラスは、太陽放射の可視光線の部分はよく通すが、赤外線のうちで波長の長いものほど通しにくい。温室では太陽放射はガラスを通して内部の物体に吸収され、物体の温度は上昇する。ところが暖まった物体の出す放射は、赤外線のうちでも主に波長の長い部分のものであって、ガラスで有効に断たれる。そのために、温室内に熱が蓄積されて温室内の温度が上昇する。温度の上昇とともに温室内からの放射が短い波長の赤外線をより多く含むようになり、それとともにガラスを通して外へ逃げるエネルギーも増加する。この逃げるエネルギーの量が、可視光線として入ってくるエネルギーの量とちょうど等しくなったときに温室内の温度は一定になる。

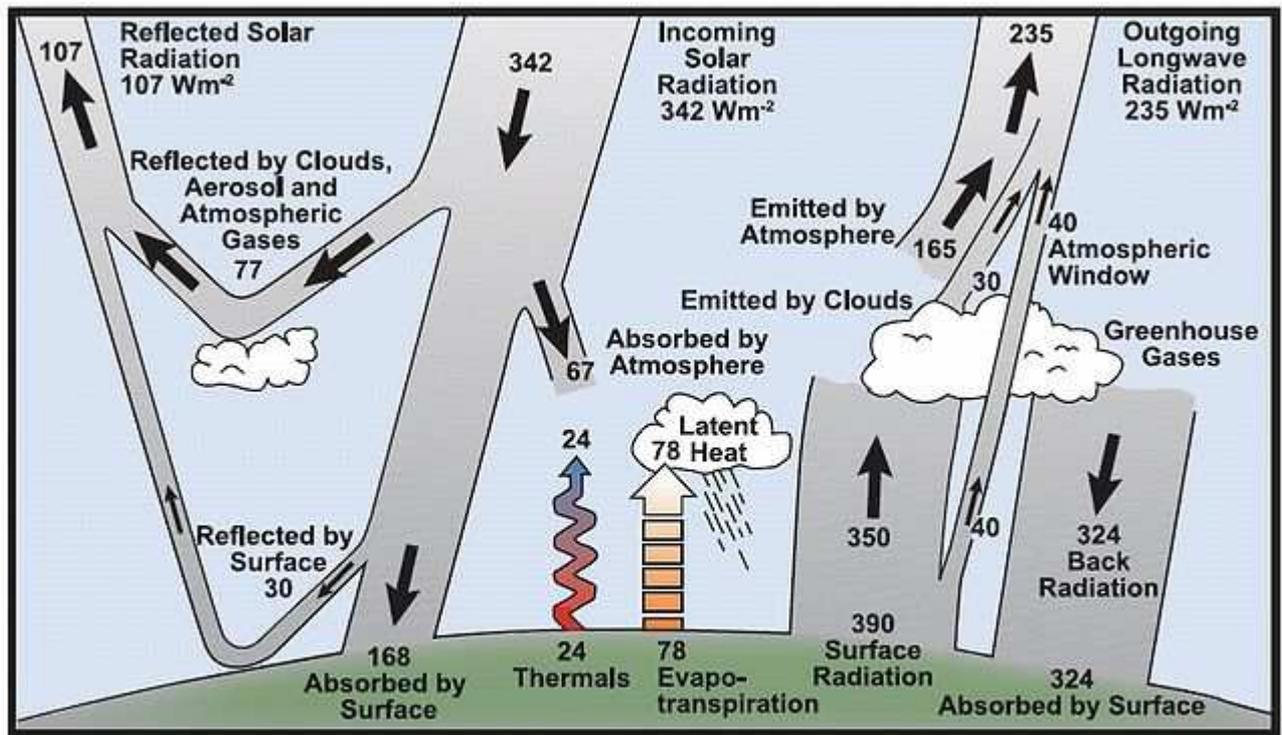
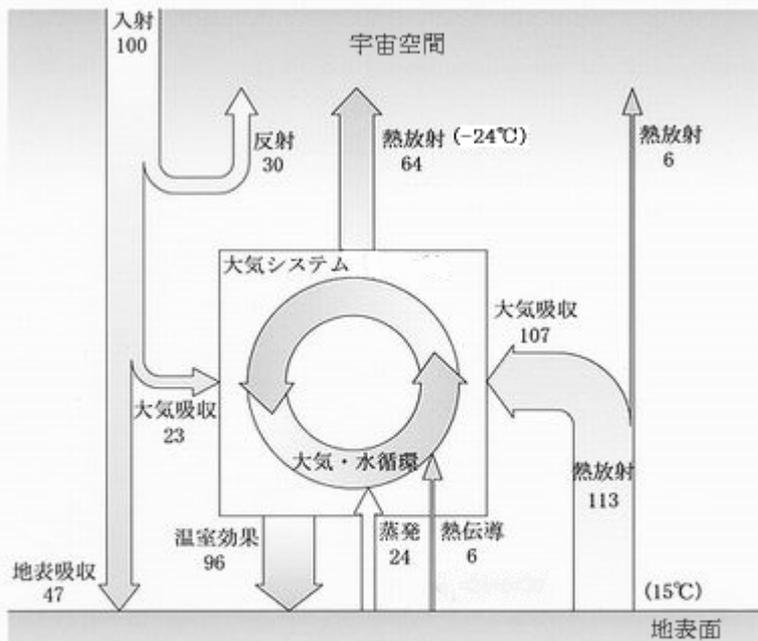
解説:

高校の教科書における温室効果の説明はほとんど誤りばかりです。まず簡単に温室効果について解説します。

地球の下層大気を構成する主要な3原子分子以上の気体分子は、分子振動などにもなって特定の波長(周波数)帯域の赤外線を吸収するとともに放射しています(前掲の「大気通過後の放射スペクトル分布」参照)。

地球の表面からの赤外線放射に対しては対流圏大気下層で水蒸気と二酸化炭素分子を中心とする温室効果ガスが大部分を吸収します。温室効果ガスに吸収された赤外線のエネルギーは主に分子衝突によ

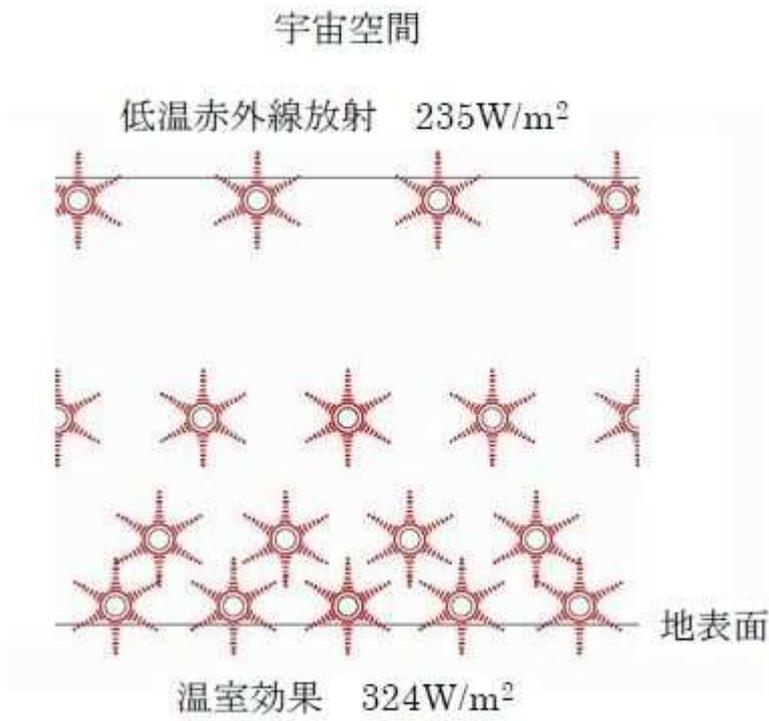
って大気を構成する気体分子に均等に分配されます。



FAQ 1.1, Figure 1. Estimate of the Earth's annual and global mean energy balance. Over the long term, the amount of incoming solar radiation absorbed by the Earth and atmosphere is balanced by the Earth and atmosphere releasing the same amount of outgoing longwave radiation. About half of the incoming solar radiation is absorbed by the Earth's surface. This energy is transferred to the atmosphere by warming the air in contact with the surface (thermals), by evapotranspiration and by longwave radiation that is absorbed by clouds and greenhouse gases. The atmosphere in turn radiates longwave energy back to Earth as well as out to space. Source: Kiehl and Trenberth (1997).

一方、地球大気に含まれる温室効果ガスは気体の温度状態に対応する定常的な赤外線を全方向に対して常に放射しています。赤外線放射強度は大気温度が高いほど強い(絶対温度の4乗に比例→太陽放

射と地球放射)ので、標高が低いほど強い赤外線放射が起こっています。大気中に放射された赤外線は大気中を進むうちに周囲の温室効果ガスに吸収されて減衰します。



地球大気の下層の比較的温度の高い大気から全方向に放射された赤外線の内、大気中の温室効果気体に吸収される以前に地表面に到達する赤外線のエネルギーを総称して温室効果と考えればよいでしょう。

逆に対流圏上層において低温の大気から全方向に放射される赤外線の内、地球大気にとらわれずに宇宙空間に放射される赤外線によって地球は放熱しているのです。つまり、温室効果と地球からの低温赤外線放射による放熱には直接的な関係はないのです。宇宙空間に放射される低温赤外線放射のエネルギーと地球の受け取る有効太陽放射のエネルギーが平均的に見ると平衡しているために地球の温度状態は安定しているのです。

さて、説明では『大気からも赤外放射が行なわれるが、その約 3 分の 2 がは地表面に戻って地表を暖めている。』とありますが、この 3 分の 2 というのはまったく無意味です。既に説明したように地球大気を構成するすべての温室効果気体は常にその温度状態に応じた赤外線を全方位に放射していますが、それを大気全体にわたって総和した量は莫大な値になります。地表に到達するのは対流圏下層で温室効果気体が放射し、温室効果気体が吸収する以前に地表に到達した一部の赤外線に過ぎません。一体何の 3 分の 2 なのか不明です。この説明を書いた方は温室効果がまったくわかっていないようです。

次に、ガラス温室の解説についてです。

まず、標準的なガラスの透過スペクトルを示します。

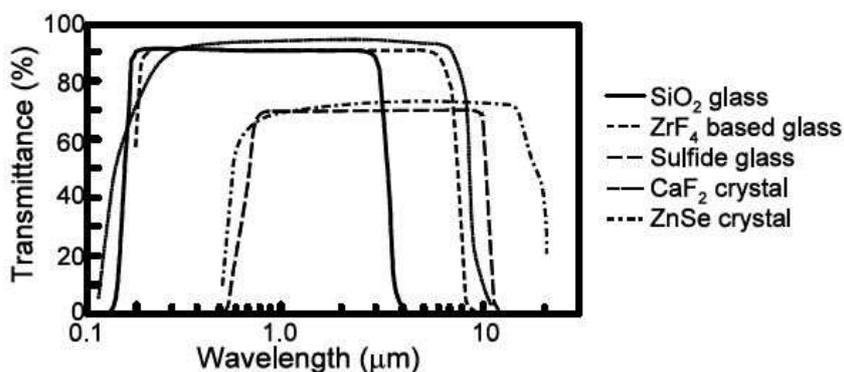
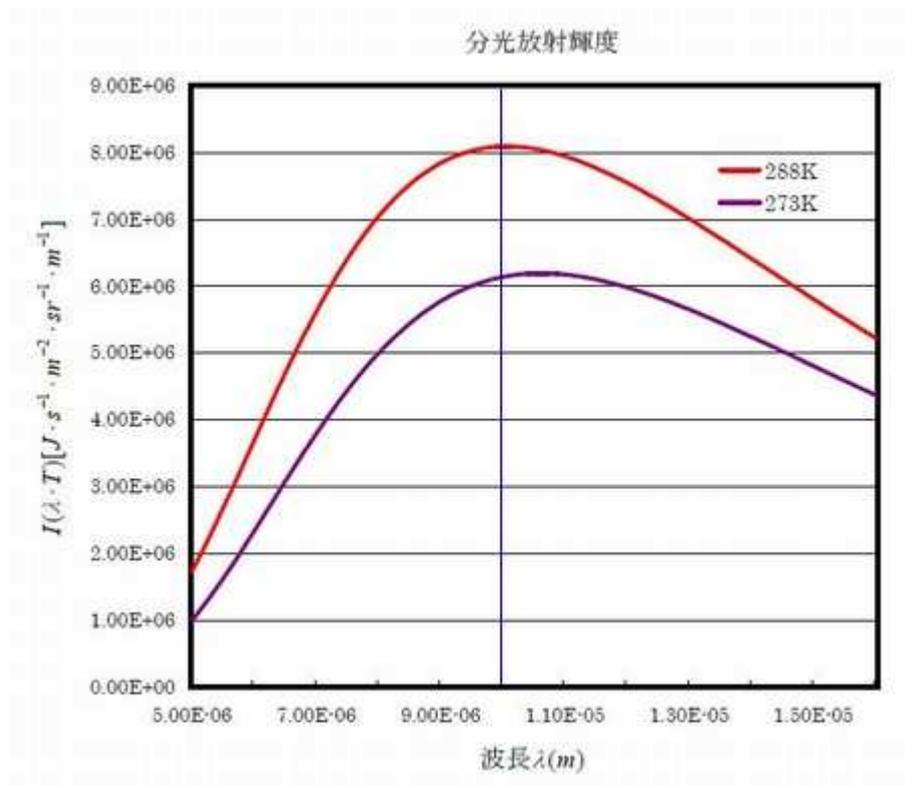


図2 種々のガラス及び単結晶の透過スペクトル。 ^{4,5)}

概ね、0.1 μm ～10 μm の範囲でフラットな透過特性を見せています。10 μm 以上の長波長はほとんど吸収することがわかります。

これに対して 0 $^{\circ}\text{C}$ (273K)の物体と 15 $^{\circ}\text{C}$ (288K)に暖められた物体からの黒体放射強度の分布を次の図に示します。



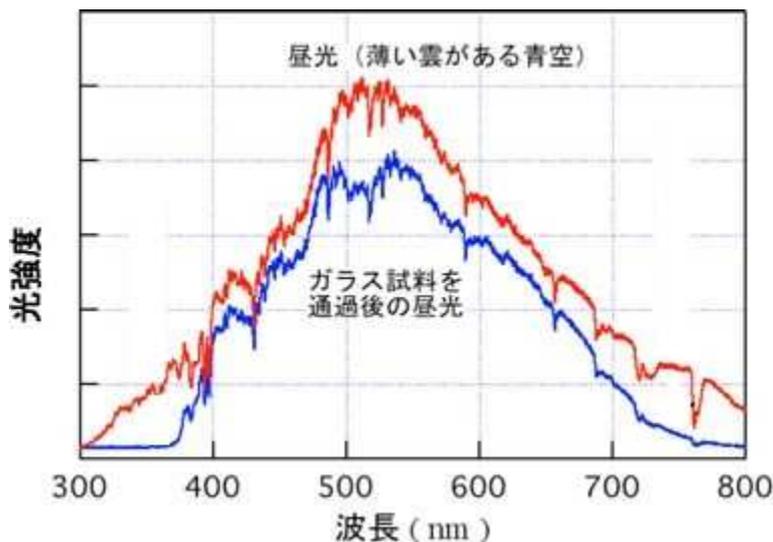
いずれも 10 μm 付近にピークを持ち、長波長側に長い裾野を持つ分布になります。10 μm よりも短波長側のエネルギーの比率が極端に変わるわけではありません。

説明では長波長側の赤外線がガラスによって『有効に断たれる』と述べています。確かに 10 μm よりも長

波長側の赤外線はガラスに『吸収され』ますからガラスは暖められます。ガラスも物体ですから OK にならない限り電磁波を放出しており、暖められたガラスは赤外線を温室の内外の両方向に放射しています。

『短波長の赤外線をより多く含むようになり、それとともにガラスを通して外へ逃げるエネルギーも増加する。』と述べていますが、放射スペクトルを見る限りそれほど顕著な割合の変化は起きないと考えるべきです。ガラスを透過する赤外線量と太陽放射が平衡することによって温度が一定になるというのは無理です。暖められたガラスからの外向きの赤外線放射や熱伝導による放熱も無視できない要因です。

ちなみに、ガラスは可視光線をよく通しはしますが、それでも表面反射や吸収で透過率は 100%ではありません。



そのため、ガラスがない場合に比べて地表を暖める太陽放射は弱くなるため、ガラス温室の存在は地表への供給エネルギー量を減らすことになります。さらに、説明した通り、ガラスは暖められた内部からの赤外線放射を吸収して温まるとその温度状態によってガラス温室の内外に赤外線を放射するため、 $10\mu\text{m}$ より長波長側の赤外線の持つエネルギーも温室の外に出ていくのです。

温室の温度が周辺大気温度よりも上昇する原因は、ガラス温室によって大気が動かないために、本来ならば暖められることで対流が生じて大気上層に運ばれる熱が移動できずに温室の中に固定されるからです。