

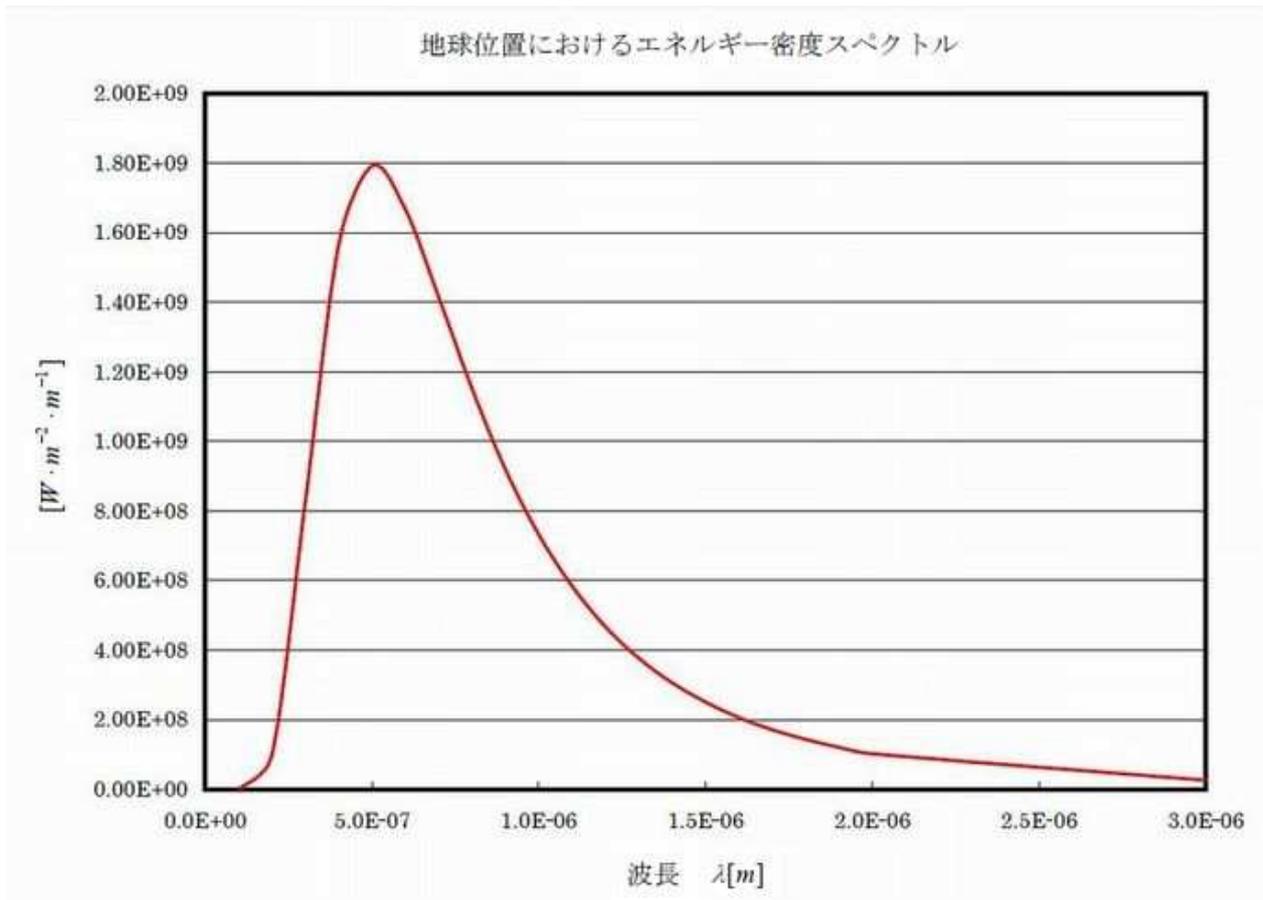
分野	地球大気熱収支
関連科学分野	光の性質、太陽放射と地球放射、下層大気温度分布、気体の状態方程式
関連環境問題	地球温暖化

## 1. 有効太陽放射

太陽の表面温度は約 5,780K 程度です。太陽表面から放射される電磁波は可視光線帯域を中心に分布しています。太陽の表面温度を 5,780K とした場合の太陽放射のエネルギー密度スペクトル

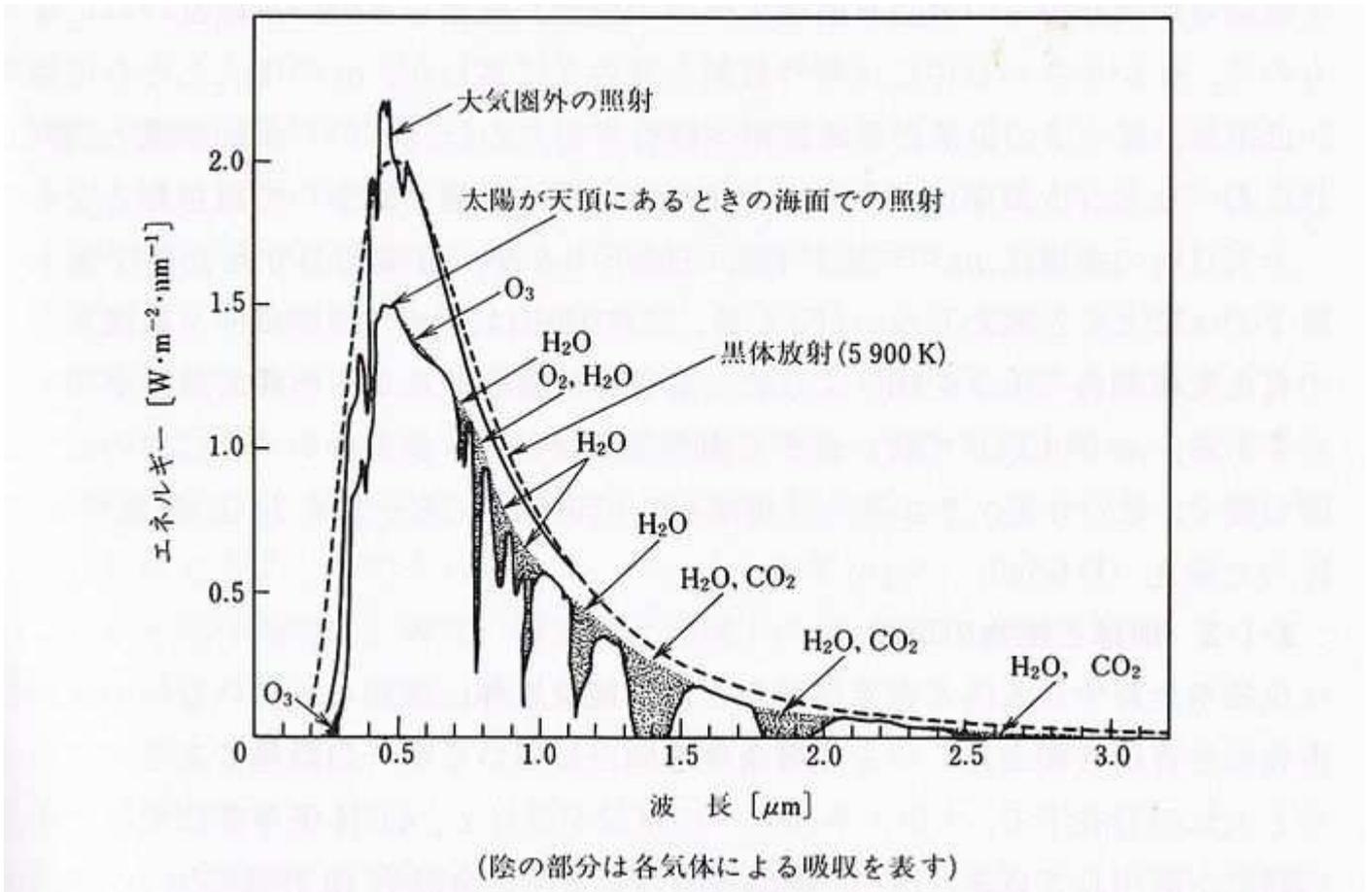
$$s(\lambda, T) = I(\lambda, T) \cdot \pi = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (W \cdot m^{-2} \cdot m^{-1})$$

が地球の大気圏外に到達したときのスペクトルは次の図の通りです。



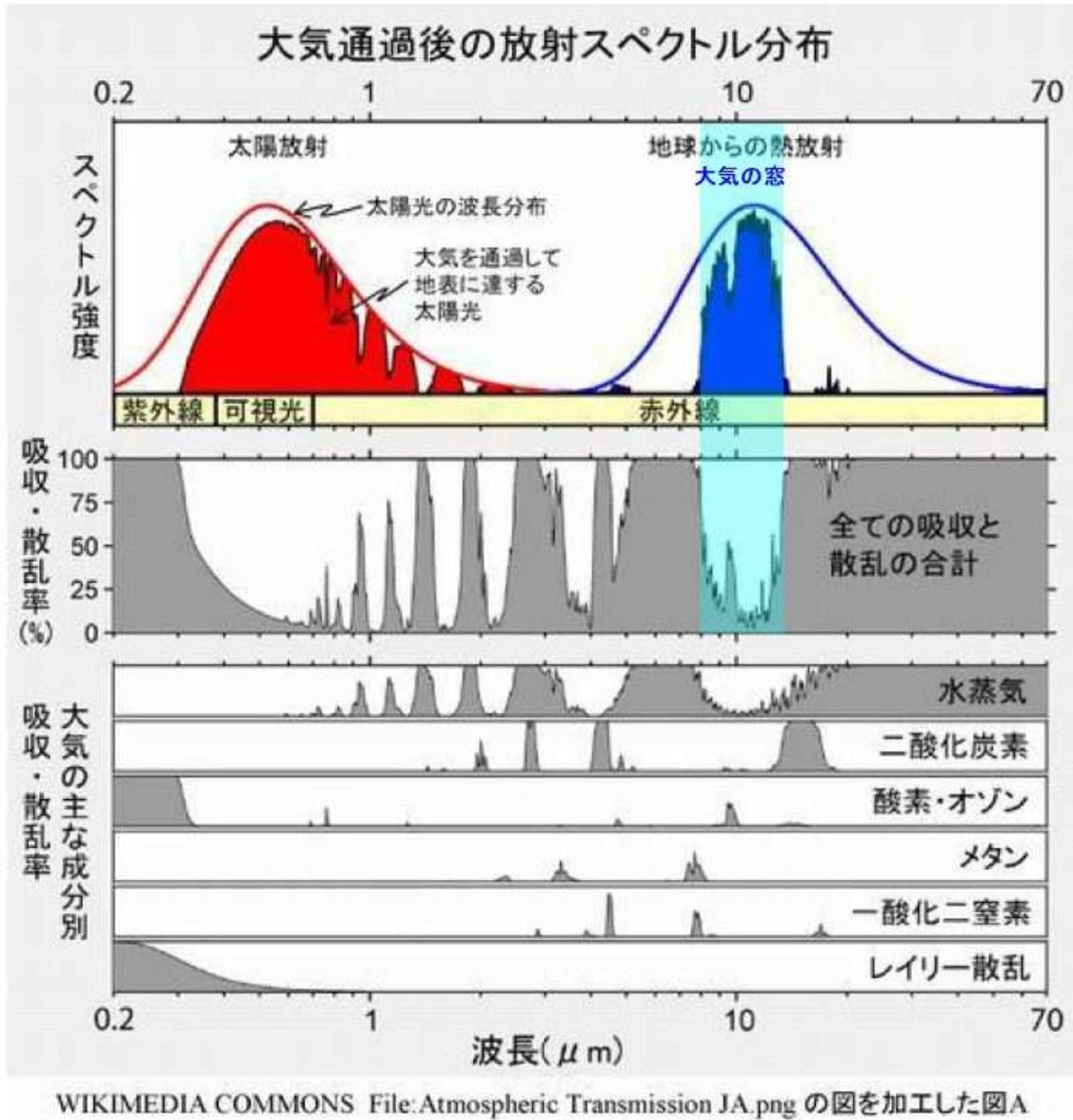
太陽放射は、可視光線の波長帯域(0.380μm～0.780μm の範囲→光の性質)を中心とする分布を持っています。上の図のスペクトルを波長に対して積分する(面積を求める)と単位面積あたりのエネルギー密度が求められます。太陽放射の地球の位置におけるエネルギー密度を太陽定数と呼び、1,366 (W/m<sup>2</sup>)程度です(→太陽放射と地球放射)。

実際の観測値を次の図に示します。



地表面に到達する太陽放射は、大気を通過することによって、反射・散乱による減衰、温室効果ガスによる吸収によって減少します。

地球の下層大気の電磁波に対する吸収スペクトルを下図に示します。



地球大気や地表面で散乱・反射されてそのまま宇宙空間に出ていく太陽放射を除いて、**地表面や大気に吸収される太陽放射を『有効太陽放射』**と呼びます。有効太陽放射は大気圏外における地球の位置の太陽放射の**70%程度**と考えられます。

## 2. 地球大気の熱収支の概要

単位時間あたりに地球が受ける太陽放射の総量は、地球の半径を  $r$  とすると

$$1366 \times \pi r^2 (\text{W})$$

この受け取った太陽放射を地球の表面が均等に受け取るとした場合の時間あたりに受け取る平均的なエ

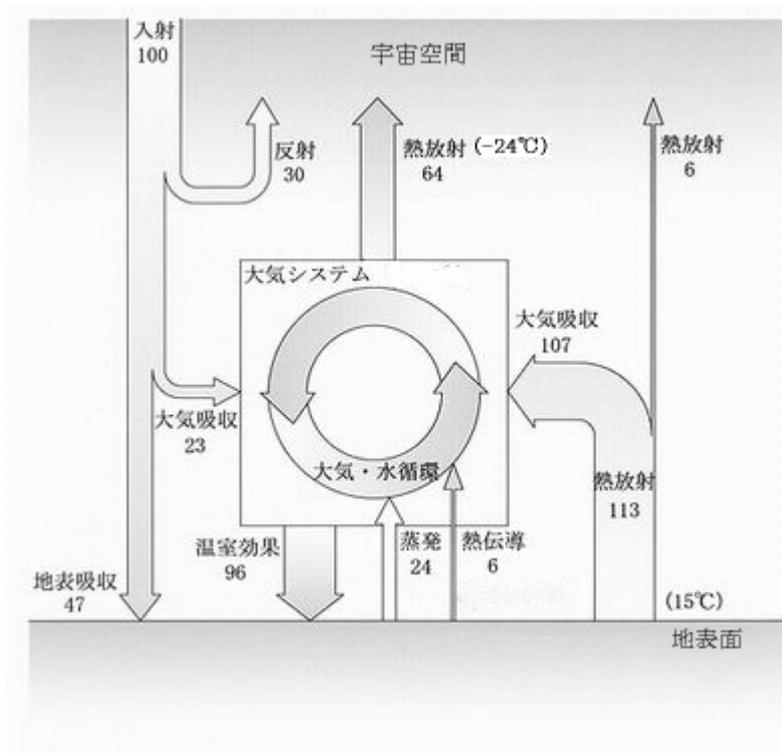
エネルギー密度は次式の通りです。

$$1366\pi r^2 \div 4\pi r^2 = 341.5 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

地球表面の単位面積あたりに受け取る平均的な有効太陽放射は次の通りです。

$$341.5 \times 0.7 \div 2 \div 2 = 239 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

平均的な太陽放射 341.5 (W/m<sup>2</sup>) を 100 とした場合の地球大気と地表の平均的な熱収支の概要を下図に示します。



## 2-1 地球表面の熱収支

太陽放射の 30 は大気や地表面で反射・散乱されて宇宙空間にそのまま出てゆきます。太陽放射の 23 程度は地表面に到達する以前に大気中の温室効果ガスによって吸収されます。その結果、地球表面に到達して**直接地表に吸収されるエネルギーは 47** になります。

太陽放射を受けて暖められた地表面の平均的な温度は 15°C (288K) 程度といわれています。地球表面から放射される電磁波のエネルギー密度は、ステファンボルツマンの法則から次の通りです。

$$5.67 \times 10^{-8} \times 288^4 \div 2 \div 2 = 390.1 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

これは 114 に相当します(図では**熱放射 113** になっています。)

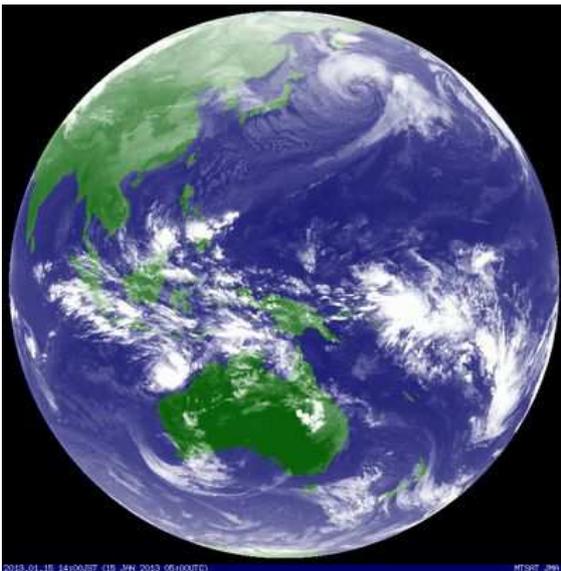
地表面放射 113 の内、107 は大気中の温室効果ガスに吸収され、6 が大気の窓などを通して直接宇宙空間に放出されます。

前出の大気の吸収スペクトルを見ると、大気の窓領域から宇宙空間に放出される地表面放射(これを放射冷却現象と呼ぶ)は 6 よりも遥かに大きいように見えます。しかし地球は平均すると面積の 50%以上が雲に覆われ、雲のない部分でも空が白く見えるような水蒸気濃度が高く透明度の低い大気は地表面放射をほとんどすべて吸収しており、事実上大気の窓は閉じています。

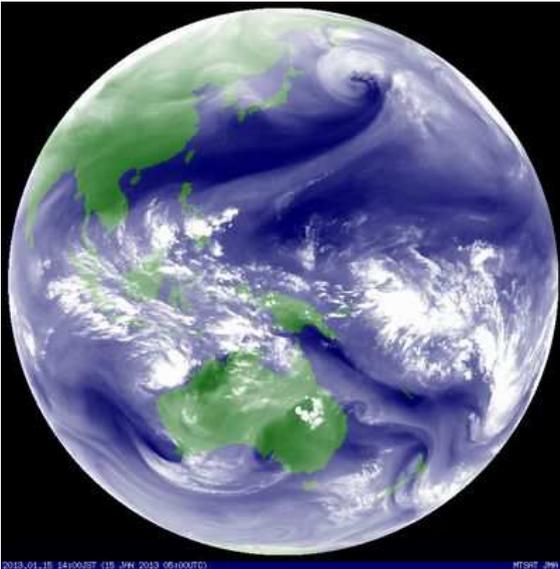
以下に 2013 年 1 月 15 日午後 2 時の可視光画像、赤外線画像、水蒸気画像を示しておきます。



可視画像は、雲や地表面によって反射された太陽光を捉える画像です。雨を伴う発達した雲ほど厚みがあり、太陽光を強く反射するためより白く写るので、視覚的にわかりやすい画像です。



赤外面像は、雲から放射される赤外線を捉えた画像です。放射される赤外線の強さは雲の温度により変化する特性をもっており、高い高度にあつて温度の低い雲を捉えやすくより白く表現しています。ごく低い雲や霧は、赤外面像にはほとんど写りません。



水蒸気画像は赤外面像の一種で、大気中にある水蒸気と雲からの赤外放射(6.8 $\mu\text{m}$  帯)を観測した画像です。この6.8 $\mu\text{m}$  帯の赤外線は、大気中に存在する水蒸気によく吸収されると同時に、その水蒸気からの放射が行われる特性を持ちます。この特性を利用して、水蒸気画像は、雲がないところでも対流圏上・中層にあるごくわずかの水蒸気からの放射を捉えることができ、その対流圏上・中層の水蒸気が多いところを白く、少ないところを黒く写るように処理が施された画像です。

放射冷却現象が顕在化するののは砂漠や寒冷な場所などの雲がなく極端に水蒸気濃度の低い場所に限られます。

暖められた地球表面では水が蒸発し、**蒸発潜熱**として **24** が地表面から奪われます。蒸発した水蒸気は大気中を上昇することで断熱的に膨張することで冷却され、凝結して水滴になるときに地表面で吸収した潜熱 **24** を放出して大気を暖めます(→下層大気の温度分布)。蒸発潜熱 **24** は、地球の平均的な蒸発量＝降水量 1000mm 程度に対応する値です。

$$\text{水の蒸発潜熱 } 588.7(\text{kcal/kg}) = 588.7(\text{cal/g}) \times 4.184(\text{J/cal}) = 2463(\text{J/g}) = 2463(\text{J/ml})$$

年間降水量を 1000mm とすると、1 $\text{m}^2$  当たりの年間の蒸発潜熱の合計は次の通りです。

$$100^3(\text{ml/年 } \text{m}^2) \times 2463(\text{J/ml}) = 2.463 \times 10^9(\text{J/年 } \text{m}^2) = 2.463 \times 10^9 \div 365 \div 24 \div 3600(\text{W/m}^2) = 78.1(\text{W/m}^2)$$

これは  $78.1/341.5 = 22.8$  に相当します。

さらに、暖められた地表面からは大気への**熱伝導**で **6** 程度を放熱しています。

地球の下層大気中の温室効果ガスの赤外線放射の内、地表面にまで到達する **96** を温室効果と呼ぶことがあります。

以上をまとめると、地表面の熱収支は、

$$47(\text{太陽放射}) + 96(\text{温室効果}) = 113(\text{地表面放射}) + 24(\text{蒸発潜熱}) + 6(\text{熱伝導})$$

となり、均衡しています。

## 2-2 下層大気の熱収支

大気に含まれる温室効果ガスは、赤外線に当たる帯域の電磁波を吸収します(前出の吸収スペクトルを参照)。下層大気は太陽放射から直接 23 を吸収します。さらに、地表面放射 113 の内 107(約 95%) を吸収します。

さらに、蒸発潜熱によって 24、熱伝導によって 6 を吸収します。

こうして大気に吸収された 160 の熱(エネルギー)は主に分子衝突によって地球大気を構成する分子の内部エネルギーとして均等に分配されます。この状態を局所熱力学平衡と呼びます(実際の地球の下層大気は、重力的な安定性を回復するために常に対流運動をしており、また地球規模の大域的な循環運動をしているため、厳密には熱平衡状態ではありませんが、部分的に見れば近似的に熱平衡状態とみなしても良いという意味で、局所熱力学平衡と呼んでいます。)

局所熱力学平衡状態では、すべての気体分子の運動モードに対して均等にエネルギーが分配されており、その大部分が気体分子の並進運動のエネルギーに分配されています。大気の温度とは気体分子の並進運動の活発さの尺度です(→気体の状態方程式)。

下層大気に含まれる水蒸気や二酸化炭素などのいわゆる温室効果ガスは、分子の内部運動モードの内、回転や振動に伴って赤外線を吸収したり放出したりします。局所熱力学平衡状態では、大気の温度状態によって温室効果ガスの一定の割合が定常的に励起された状態にあり赤外線を放射しています。物体から放射される電磁波の強さは物体の表面温度の 4 乗に比例する(→太陽放射と地球放射)ため、大気からの赤外線放射も温度の高い下層ほど強くなります(→下層大気の温度分布)。

温室効果ガスからはあらゆる方向に赤外線が放射されます。放射された赤外線は大気中を進むうちに周辺の温室効果ガスによって吸収されて減衰します。比較的低層の大気が放出した赤外線の内、大気に吸収されずに地球表面にまで到達する赤外線 96 のことを温室効果と呼んでいます。

同様に、対流圏上層の温室効果ガスや、雲がある場合には雲頂から放射される赤外線放射の内、地球大気に吸収されずに 64 が宇宙空間に放出されています。

以上から、下層大気の熱収支をまとめると次の通りです。

$$23(\text{太陽放射}) + 107(\text{地表面放射}) + 24(\text{蒸発潜熱}) + 6(\text{熱伝導}) = 96(\text{温室効果}) + 64(\text{低温赤外線放射})$$

## 2-3 地球の熱収支と地球の放射平衡温度

地球大気上層では、太陽放射 100 を受け、その内の 30 はそのまま宇宙空間に反射・散乱されます。対

流圏上層の温室効果ガスや雲から低温赤外線放射 64 が宇宙空間に放出されています。さらに、放射冷却現象で地球の表面からの赤外線放射の一部 6 も地球の放熱に寄与しています。

以上をまとめると地球の熱収支は次の通りです。

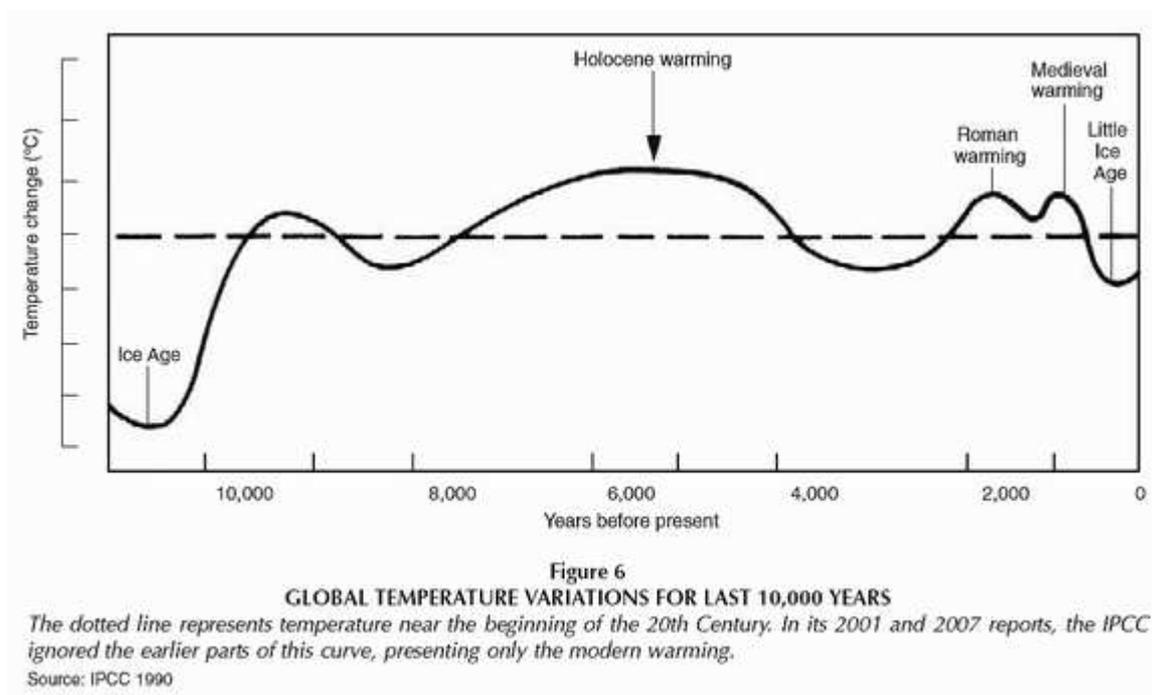
$$100(\text{太陽放射}) = 30(\text{反射・散乱}) + 64(\text{低温赤外線放射}) + 6(\text{地表面放射})$$

これまで見てきたように地球の放熱に寄与する赤外線放射は一樣ではなく、放射を行う場所、物の温度状態によってスペクトルの分布も強さも異なります。これを無視して、有効太陽放射 70 に対して、これを完全に吸収して、すべてをを放射する黒体で近似した場合の仮想の平均的な地球の温度を放射平衡温度と呼びます。ステファンボルツマンの法則から、

$$\text{地球の放射平衡温度} = (341.5 \times 0.7 \div (5.67 \times 10^{-8}))^{1/4} = 254.8 \text{ (K)}$$

約 255K = -18°C です。これに対して実際の地球の平均気温は 15°C 程度になります。つまり地球に大気があることによる保温効果によって気温が 33°C 程度高くなっているのです。

地球の平均的な温度状態は多少の変動はあるものの、比較的安定しています。地球の温度状態はほとんど定常的に推移しているのです。



このような(準)定常状態にあるということは、地球の熱収支は平均的に見れば均衡しているのです。もしこれが不均衡な状態になった場合には温度状態は非定常に高温化するか低温化することになります。

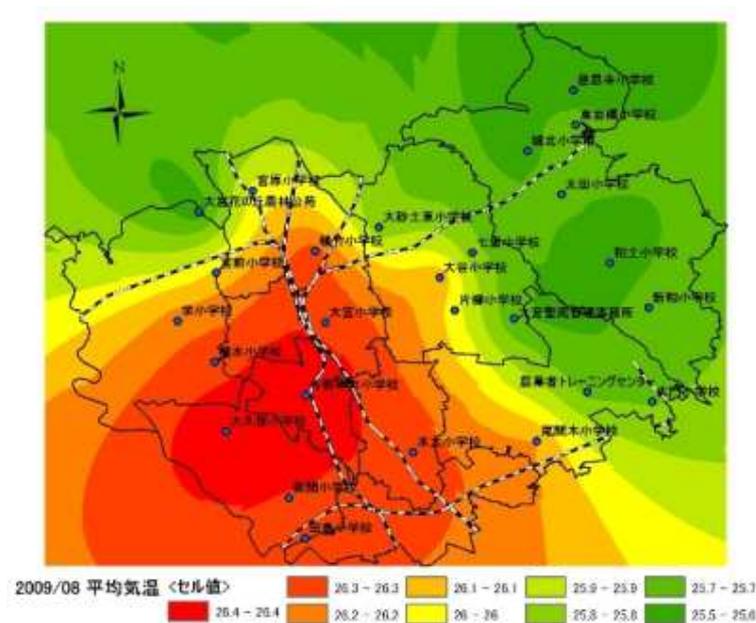
地球温暖化の説明模式図でよく見られるのが次のような図です。



この図ではおそらく矢印の幅がエネルギー量を示していると考えられますが、これでは地球の熱収支が不均衡であり、地球は熱暴走状態になってしまいます。地球の表面環境の温度＝気温が多少上がろうが下がろうが、熱収支は均衡していなければならないのです。

### EX.ヒートアイランド現象

都市化による表面環境の高温化をヒートアイランド現象と呼んでいます。これは気温のコンターラインが都市部を中心に同心円状になるためにこう呼ばれています。



ヒートアイランド現象の原因は、都市部で集中的に人工エネルギーを消費するためだといわれています。たしかにそれも原因の一つです。

しかし、大都市ばかりでなく地方都市でも気温の上昇は明らかです。その主要な原因は地表面の植生が減少し、不透水性の舗装に置き換えられ、地表面からの水の蒸発量が激減したことによります。日本は世界的には降水量の多い地域です。しかし、都市化による表面舗装と雨水を急速に排水する下水道の整備によって地表面からの蒸発量は激減しています。

太陽放射  $341.5\text{W/m}^2$  を 100 とした場合、平均的には 24 に当たる  $82\text{W/m}^2$  程度が水の蒸発潜熱によって地表面は冷却されています。地表面からの蒸発量が半減し、蒸発潜熱による冷却の代わりに地表面放射で放熱が行なわれると仮定した場合、地表面放射で放熱されるエネルギーは次のように増加します。

$$341.5\text{W/m}^2 \times (113 + 24/2) / 100 = 426.9\text{W/m}^2$$

ステファン=ボルツマンの法則から地表面温度を求めると次の通りです。

$$T = \{426.9 \div (5.67 \times 10^{-8})\}^{1/4} = 294.6\text{K} = 21.6^\circ\text{C}$$

つまり、地表面からの蒸発量が半減するだけで地表面温度は  $15^\circ\text{C}$  から  $21.6^\circ\text{C}$  に  $6.6^\circ\text{C}$  も上昇するのです。

大都市ばかりでなく地方都市の市街地においても地表面が舗装で覆われた結果、気温の上昇が起きているのです。