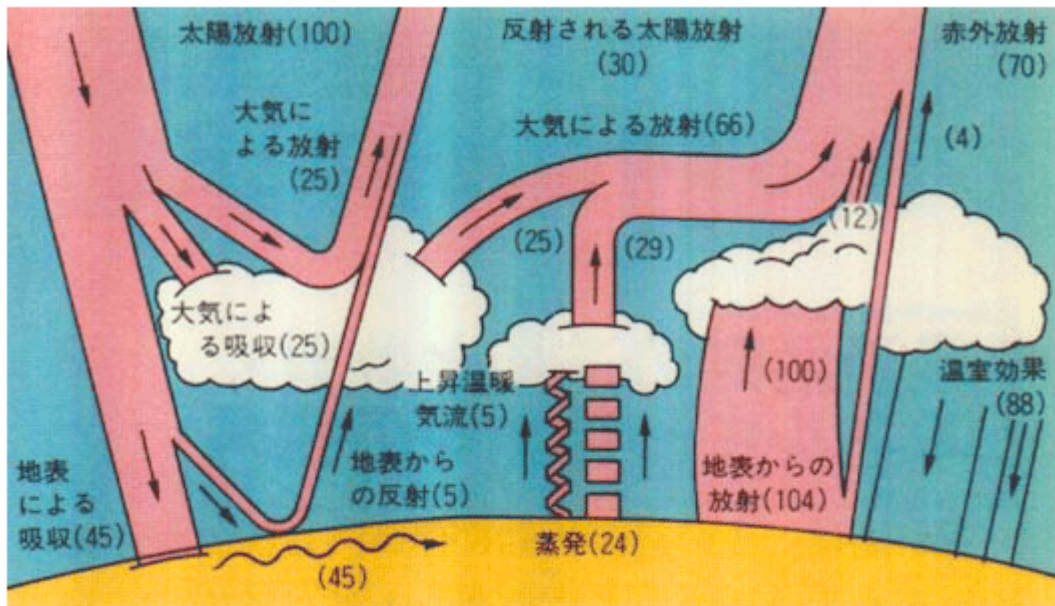


温室効果と大気放射

HP 管理者 近藤 邦明

1. 地球の気象システムの平均的熱収支

地球大気に於ける温度構造を説明する上でよく見られるのが平均的な熱収支図です。多少数値が異なる場合もありますが、基本的には次の図に示されるようなものが一般的です。



S. H. Schneider, Climate Modeling. Scientific American 256 : 5.72-80, 1987

※この図の単純な誤りを訂正しておきます。左上の太陽放射 (100) のすぐ下の大気による放射 (25) は『大気による反射』の誤りです。

<http://www.geocities.jp/obkdshiroshige/ondanka3/skgup2.html>

この図は、地球の位置における太陽放射強度（太陽定数と呼ぶこともある。）である $1,370\text{W/m}^2$ の $1/4$ の値を 100 とした場合の平均的な熱（エネルギー）の単位時間当たりの相対的な移動量の概略を示したものです。

まず、地球の位置における太陽放射強度はどのように決まるかを考えておくことにします。太陽と地球の距離を $149,597,870\text{km}$ 、太陽の直径を $1,392,000\text{km}$ 、太陽表面温度を $5,780\text{K}$ とします。太陽表面における放射強度はステファン・ボルツマンの式から次のように求めることができます。

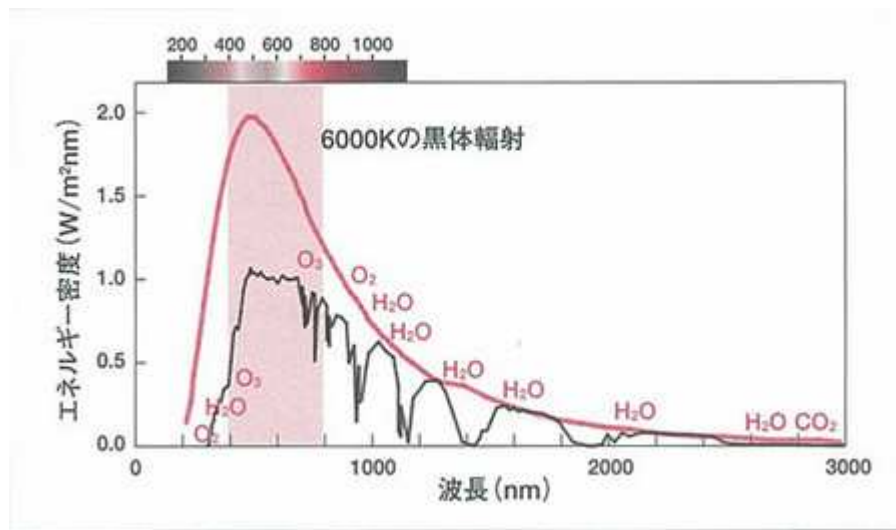
$$S_0 = \sigma T^4 = (5.67 \times 10^{-8}) \times 5,780^4 = 63,284,071.5\text{W/m}^2$$

太陽は球体であり、放射強度は太陽からの距離の 2 乗に反比例して減衰します。地球の位置における太陽放射強度は、

$$S = S_0 \times ((1,392,000/2) / 149,597,870)^2 \doteq 1,370\text{W/m}^2$$

平均的な熱収支図では、 $S/4=342.5\text{W/m}^2$ を 100 として描かれています。これは、太陽放射に直交する面に投影された地球（半径 r ）の断面積（ $=\pi r^2$ ）が受取る太陽放射の総量を、球体の地球の表面積（ $=4\pi r^2$ ）に対して均等に配分した場合の強度と言う意味です。つまり、熱収支図とは、平均的な地球の表面の単位面積・単位時間当たりの熱（エネルギー）の移動量を示したもののなのです。

以下、地表面、大気システムについての熱（エネルギー）の収支についてみていくことにします。



地表に到達する太陽放射の大気による減衰

赤の実線は太陽表面における放射強度を 6000K の黒体放射とした場合の地球の位置（大気圏外）における放射強度を示す。黒の実線で示した地表レベルでの太陽放射の観測値との差が大気による減衰（大気による反射・散乱と気体分子による吸収）を示す。着色部分は可視光線の波長領域を示す。

<http://f.hatena.ne.jp/kkyamasita/20070413080039>

まず地表面について考えます。太陽放射を構成する電磁波の波長領域は紫外線～可視光線～赤外線領域に分布しています。太陽放射の内 25 は雲や大気による反射によってそのまま宇宙空間に散乱します。更に紫外線はオゾン層においてほとんど吸収され、赤外線は地球大気の中に存在する赤外活性気体、いわゆる『温室効果ガス』に吸収されるため、地表に到達する太陽放射は減衰して可視光線を中心とする 45 になります。

地表面の温度は平均的に 15°C (288K) 程度であると言われています。地表面が黒体で近似できるとした場合、地表面からの放射の波長領域は主に赤外線となり、その放射強度はステファン・ボルツマンの式から次のように計算できます。

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

これは、 $(390/342.5) \times 100 = 113.9$ に相当します。実際には地表面は黒体ではないので、実際の放射強度は射出率 $\epsilon < 1.0$ を用いて次のように書き表されます。

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

図では、地表面の放射強度を 104 としていますから、 $\epsilon = 104/113.9 = 0.913$ 程度としていることとなります。

更に、地球には表面水があり、しかも大気によって覆われています。そのため、放射以外に水の蒸発による潜熱 (24) や大気への熱伝導 (図では上昇温暖気流と表記: 5) で放熱しています。

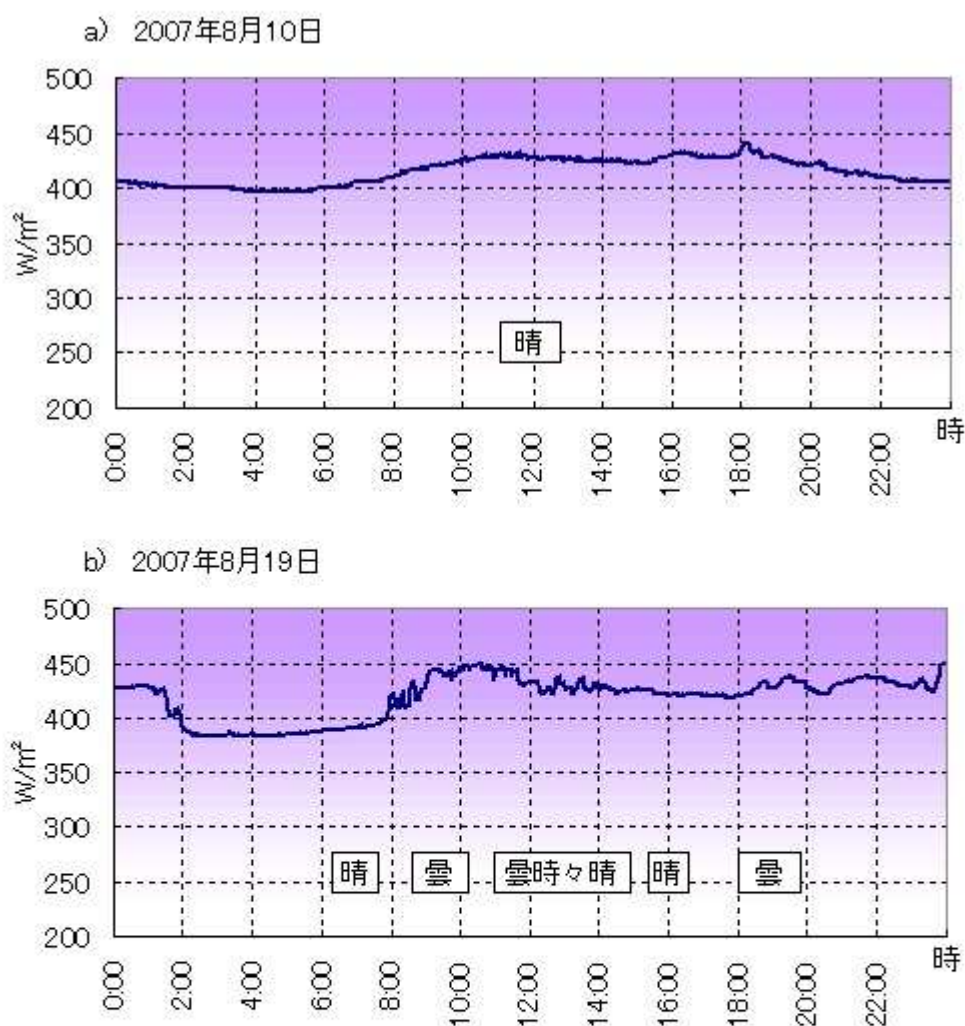
さて、仮に地表面への熱 (エネルギー) の入力 that 太陽放射 45 だけだとすると、出力 133 に比べて 88 だけ不足することになります。これでは地表面は非定常に冷却されてしまうこととなります。これを補っているのが大気システム下端から地表面に供給される大気からの赤外線放射です。詳細については後述することになります。

次に大気システムについて考えます。大気システム (大気、雲、エアロゾルなどで構成) は、前述の通り太陽放射の一部 (25) を直接受取り、更に地表水の蒸発潜熱 (24) と地表面からの熱伝導 (5) と地表面放射 (100) によって熱 (エネルギー) を受取ります。

対流圏大気のように比較的分子密度の高い気体は、「局所熱力学平衡」状態にあり、大気中におけるエネルギーの移動あるいは分配比率は絶えず頻繁に起こる分子衝突 (= 大気を構成する気体分子の並進運動状態) によって支配されています。気体のエネルギー状態は、気体分子の運動 (= 並進) エネルギー、気体分子内のエネルギー状態 (回転、振動) で表されますが、局所熱力学平衡状態では、太陽放射 (25)、蒸発潜熱 (24)、熱伝導 (5)、地表面放射 (100) で大気システムに供給された熱 (エネルギー) が分子衝突によって並進・回転・振動エネルギーの間で常に相互転化しており、確率的にある一定の割合で並進・回転・振動エネルギーに分配されています。

その結果、大気の温度状態 (= 気体分子の並進運動状態) に対して、常に一定の割合の赤外活性気体分子は内部エネルギー的に励起された状態にあり、その温度状態に対応する定常的な赤外線を放射しています。

気体からの放射現象は、固体からの放射現象とは異なり、固定された表面が存在しません。ある高度で放射された赤外線は大気中のあらゆる方向に放射されますが、大気中を進むうちに赤外活性気体に吸収されて減衰していくこととなります。



つくば（高層気象台）における下向き赤外放射量観測例

a) は終日晴天の観測例で、下向き赤外放射量は太陽放射により下層大気が暖められる日中に大きくなる。16時から19時頃にかけて値が大きくなっているのは、上空に若干雲が広がり、雲からの下向き長波長放射が増えたためである。

b) は晴れで時々雲が広がる日の観測例であり、雲による下向き長波長放射への影響がよくわかる。夜半から8時頃まではよく晴れており、放射冷却の影響で値が小さいが、8時頃から急速に厚い雲に覆われたため、値は急激に大きくなっている。

http://www.kousou-jma.go.jp/obs_third_div/longwave.htm

この観測結果は、太陽放射の直達放射を取り除いた大気からの赤外線放射を「放射エネルギーを熱エネルギーに変換して熱電対により測定する熱型放射測器」によって測定したものです。観測条件は8月の北緯36度における観測値です。平均的な熱収支図の値 $342.5 \times 0.88 = 301 \text{ W/m}^2$ と直接定量的な比較は出来ませんが、オーダー的にはよく一致すると考えられます。

現状の地球大気システムでは、下端において比較的下層の大気で放射された赤外線の内、

赤外活性気体に吸収されずに地表にまで到達したものが 88 となって地表温度を維持していると同時に、上端において比較的上層の大気で放射された赤外線の内、赤外活性気体に吸収されずに宇宙空間に放出される赤外線 66 が地表面から直接宇宙空間に放出される赤外線 4 と共に、有効な太陽放射 70 とバランスすることによって、大気温度の定常状態が維持されているのです。

ここで、大気システムの下端と上端から放射される赤外線放射強度が非対称である理由を考えることにします。既に本 HP 所収の『大気温度はどのように決まるか』で触れたとおり、地球の重力場における大気の鉛直温度分布は、大気の熱的・力学的な安定性から対流圏では下層ほど高く上層ほど低く、湿潤温度減率に従っていることを示しました。放射強度は絶対温度の 4 乗に比例するために、大気からの放射強度は下層ほど大きく、上層ほど小さくなるのです。これに、大気分子密度による赤外線の減衰率の違いが影響しているものだと考えられます。

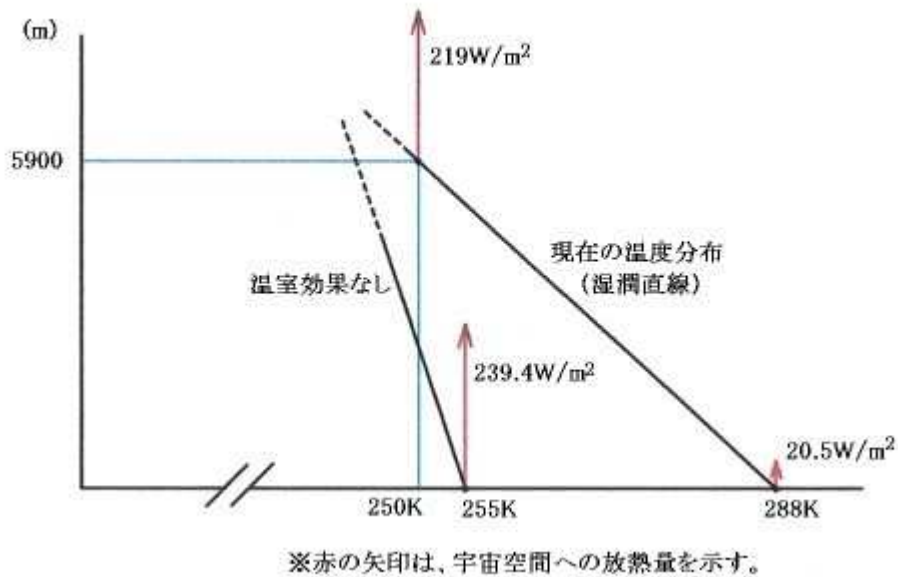
2. 温室とは異なる「温室効果」

では『温室効果』とは何なのでしょう？一般的に地球を包んでいる大気によって、地表面が 15°C 程度に保たれているしくみをこう呼ぶようです。

地球に大気が存在しない場合について考えることにします。この場合、地表には植生が存在出来ませんから地球表面による太陽放射の反射率も大きく変わると考えられますが、ここでは反射率は変化しないものとしておきます。地球を暖めるために有効な平均的な太陽放射は $342.5 \times 0.70 \div 240 \text{W/m}^2$ になります。これに対する放射平衡温度で平均的な地表面温度が近似できるものとする、ステファン・ボルツマンの式から地表面温度は次のように求められます。

$$T = \{240 / (5.67 \times 10^{-8})\}^{(1/4)} \div 255 \text{K} = -18^\circ\text{C}$$

実際の現在の地表面温度は 15°C 程度といわれていますから、地球大気があることによる昇温は 33°C になります。この 33°C の昇温現象を一般的に『温室効果』と呼んでいます。しかしこれは適切な表現とは思えません。温室内の空気が周囲の環境の気温よりも高温になる主な理由は、暖められた温室内の空気が温室によって周囲の大気循環から隔離されているために、大気の流れで攪拌されないことであり、これまで述べてきた地球大気の温度構造とは異なるからです。



3. 温室効果は地表面放射の「再放射」ではない

CO₂ 地球温暖化仮説では、大気からの赤外線放射に対して誤った説明がされています。CO₂ 地球温暖化仮説では、地表面放射が温室効果 (=大気下端における下向き放射) の原因であるかのように説明されていることがあります。冒頭に示した図においても、あたかも地表面放射 104 の内の 100 が大気システムに一旦吸収された後に、その内 88 が温室効果として地表面に向かって再び放射されるように描かれています。

大気に供給される熱 (エネルギー) の経路は太陽放射 (25)・地表面放射 (100)・蒸発潜熱 (24)・熱伝導 (5) の 4 通りですが、局所熱力学平衡の下では大気の状態は頻繁に起こる分子衝突に支配されており、供給された全ての熱 (エネルギー) は等価なものとして大気を構成する分子に分配され、分子衝突を介して並進・回転・振動エネルギー間で常に相互転化を繰り返しています。その結果、エネルギーは温度状態によって定まる一定割合で並進・回転・振動に分配されており、大気は各高度の温度状態によって定まる定常的な放射を行っているのです。大気の定常的な放射のうち、大気システム下端に到達する下向きの放射が温室効果と呼ばれるものの実体なのです (註1)。

註1：温室効果、局所熱力学平衡

沖縄高専の中本氏のレポート『地球の温暖化という現象』4頁から関連部分を以下に引用する。<http://env01.cool.ne.jp/simulation/nakamoto01.pdf>

二酸化炭素の温室効果は二酸化炭素分子が電気双極子モーメントをもち、伸縮や振動などの加速度運動をすることにより双極子モーメントから赤外部の電磁波が放射されることによる。すなわち二酸化炭素の温室効果は二酸化炭素の電気双極子が加速度運動するときの電磁場の方程式 (マックスウェル方程式) で表現される。二酸化炭素という三原子分

子がつくる電磁場から放出される赤外部の光子のエネルギーとこの電磁場に吸収される光子のエネルギーが等しいとき、二酸化炭素と電磁場が共存する大気という系は平衡状態にあるといい、この過程が二酸化炭素の温室効果とよばれるのである。このことは古典解析力学の範囲内で厳密に証明することができ、実験条件を制御することにより実験室で確かめることができる。

ボーアの振動数則によれば原子または分子が放出するスペクトル線は一定の振動数をもった鋭い線であるが、原子または分子が運動しているためのドップラー効果や、他の原子や分子の存在することにより力場が乱され、また赤外エネルギーを吸収して励起された三原子分子の寿命が厳密には確定できないこと（つまり不確定性原理）により各々の線に特有の自然の幅が存在する。このようにスペクトル線の幅が広がることにたいする量子力学の説明はワイскопフ（Weisskopf）やウイグナー（Wigner）により1930年に得られている。

このことを槌田敦氏は「大気中の水蒸気の濃度が上がると水分子同士の相互作用のために、水分子が赤外線を吸収するスペクトルが広がり、赤外線が宇宙に逃げる窓が閉じる」と物理学用語を使わないでわかりやすく解説している。すなわち「水の水双極子モーメントから放射されるエネルギーのために二酸化炭素の水双極子モーメントの出番は無い」ことが論理として結論される。

つまり、地表面放射は大気に熱を供給する一つのチャンネルに過ぎず、地表面放射と温室効果（＝大気下端における下向き放射）との間には何ら直接的な関係はないのです。温室効果とは地表面放射を吸収して励起状態にある赤外活性気体が基底状態に戻ることによって起こる『再放射』ではないのです。もし仮に、大気の状態と独立に大気の放射強度が変化するのであれば、局所熱力学平衡が破れていることを意味し、対流圏下層大気の中では起こり得ないのです。

また、[独立行政法人国立環境研究所地球環境研究センター（江守正多）の解説](#)ではCO₂ どの放射・吸収の回数が増えることで温室効果が増大すると言う説明がなされていますが、そのようなことは有りません。問題なのは放射・吸収回数ではなく、大気の状態によって定まる放射を行う赤外活性気体の定常的な存在量なのです。

CO₂ 地球温暖化仮説では、CO₂ 濃度の増大で、温室効果はいくらでも増え、地表環境はいくらでも高温化すると言う主張でした。これまでの考察から、確かに赤外活性気体の存在量が顕著に変化すれば、大気の射出率の増大になる可能性はありますが、それによって単純に地表面の温度が上昇するかと言えばそうではありません。一つには、赤外活性気体の増加は大気からの放射の射出率の増大と同時に赤外線の減衰率の増大を意味するからです。また、大気は固定されたものではないため、下層大気が加熱されれば大気の大気対流や地表水の蒸散が増えるために地表付近の熱は大気上層に運ばれて余計に放熱されるためです。いずれにしても、大気中のCO₂はごく微量であり、それほど顕著な変化があるとは考えられないのです。

4. 熱は高い方から低い方へ流れる

さて、下層大気の温度構造を考える上で、CO₂ 地球温暖化仮説とは別の誤解もあるようです。その一つは、地表面よりも低温である大気システムからの放射によって、熱（エネルギー）が地表面に供給されることは、エントロピー増大則に反するものであり熱力学的に有り得ないと言う主張です。言うなれば温室効果全否定論^(註2)です。既に示した「つくば市における下向き赤外線放射観測」結果からもわかる通り、大気システム下端からの下向き放射は実在する現象であり、温室効果全否定論は演繹主義の誤用による机上の空論です。

註2：温室効果全否定論の本質的な誤り

ここでは、温室効果を大気システム下端からの下方への赤外線放射の意味とします。温室効果全否定論の本質的な欠陥は、温室効果がないと仮定すると地表面における熱収支を考えると地表面放射が現在よりもはるかに小さくなり、地表温度が維持できないことを理解していないことです。

ある温室効果全否定論者の方は、温室効果がなくても、大気の断熱圧縮で地表温度が維持できると言います。これは、温室効果がなくても対流圏上層の現在の温度が合理的に説明できるという前提です。しかし、実際には温室効果があることによってはじめて対流圏上層の現在の温度状態が説明できるのであり、温室効果がなくなれば対流圏上層の温度も低くならざるを得ず、現在の温度を合理的に説明することは出来ません。

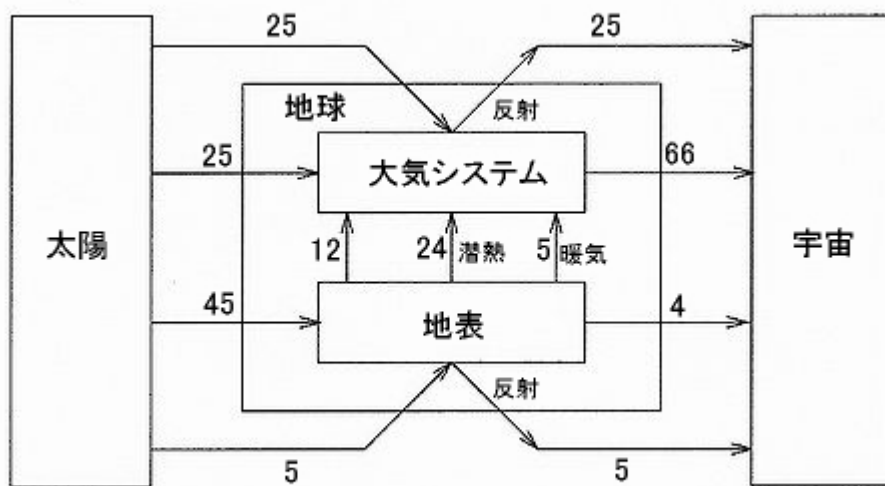
エントロピーとは、分子の巨大な集合としての物質の温度特性に関する物理量です。電磁波は物体から放射されますが、放射された電磁波自身は物質とは独立に存在するものであり、エントロピーの対象外の物理現象です。エントロピー増大の法則は、分子の巨大集合としての物質を含む系における現象の非可逆性を主張するものです。放射現象は可逆的な現象であり、それ自身はエントロピーの対象外の現象です。しかし、電磁波が一旦物質に吸収されて物質の状態量として顕在化すれば、これは勿論エントロピー増大則によって支配されることとなります。

さて、大気システムと地表面との間の放射現象を考えることにします。大気は地表面に接していますが、電磁波による熱（エネルギー）の輸送は本来は物体同士が直接接している必要がない点が熱伝導とは異なります。これまで見てきたように、固体である地球の表面、そして気体である大気はその温度状態に対応する赤外線を放射しています。赤外活性気体はその温度状態に応じてあらゆる方向に向かって電磁波を放射しています。大気システム下端からの下向き放射の強度は 88、地表面からの放射は 104 ですが、地表放射の内の 4 は大気システムに捉えられえることなく宇宙空間に放射されますので、大気システムに吸収される放射は 100 になります。

ここで『放射伝熱』を考えます。これは絶対温度が 0 でない異なる温度の物体間の放射による実質的な熱移動を示す尺度です。二つの物体の表面温度をそれぞれ $T_1 > T_2$ とすると、その放射強度 R はそれぞれの表面温度の 4 乗に比例するので $R_1 > R_2$ になります。この時、

高温物体は単位時間・単位面積当たり R_1 のエネルギーを失い、同時に R_2 のエネルギーを受取ることになります。つまり、高温物体は差し引きすると $(R_1 - R_2) > 0$ の熱を失い、同様に低温物体は $(R_1 - R_2) > 0$ の熱を受取ることになります。この $(R_1 - R_2) > 0$ で表される実質的な熱（エネルギー）の移動量が放射伝熱量です。

つまり、放射現象によって熱（エネルギー）は高温物体と低温物体の間で相互に受け渡されますが、実質的な熱の移動は常に高温物体→低温物体に流れており、高温物体と低温物体を含む系としてはエントロピーは必ず増大しているのです。冒頭に示した図を元に、放射伝熱量で実質的な熱の移動量についてまとめたのが次の図です。



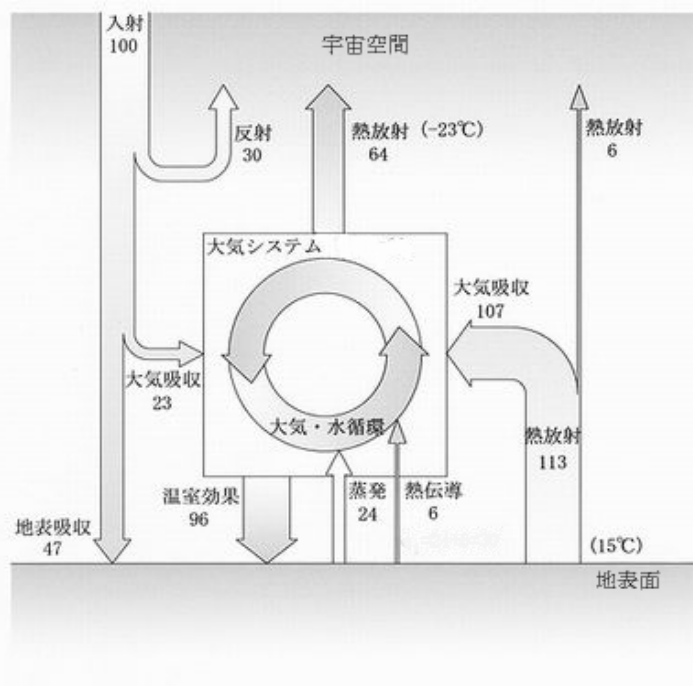
※注釈のない数値は放射伝熱量を示す。

上図において、地表から大気システムに向かう放射伝熱量 12 は、冒頭の図の大気システムに吸収される地表面放射 100 (R_1) から温室効果 88 (R_2) を差し引いた値を示しています。太陽からの放射伝熱量は、地球の表面温度が太陽の表面温度に比べて著しく低いため、地球放射による影響は限りなく 0 に近いために、太陽放射そのものとして大きな誤りはありません。同様に、地球から宇宙空間への放射伝熱量は地球からの放射そのものと同じになります。

図から明らかなように、熱（エネルギー）は高温の太陽から地球を経由して、最終的に低温の宇宙空間へと拡散していくのです。地球では高温の地表面からより低温の大気システムあるいは宇宙空間に熱は流れていくのです。

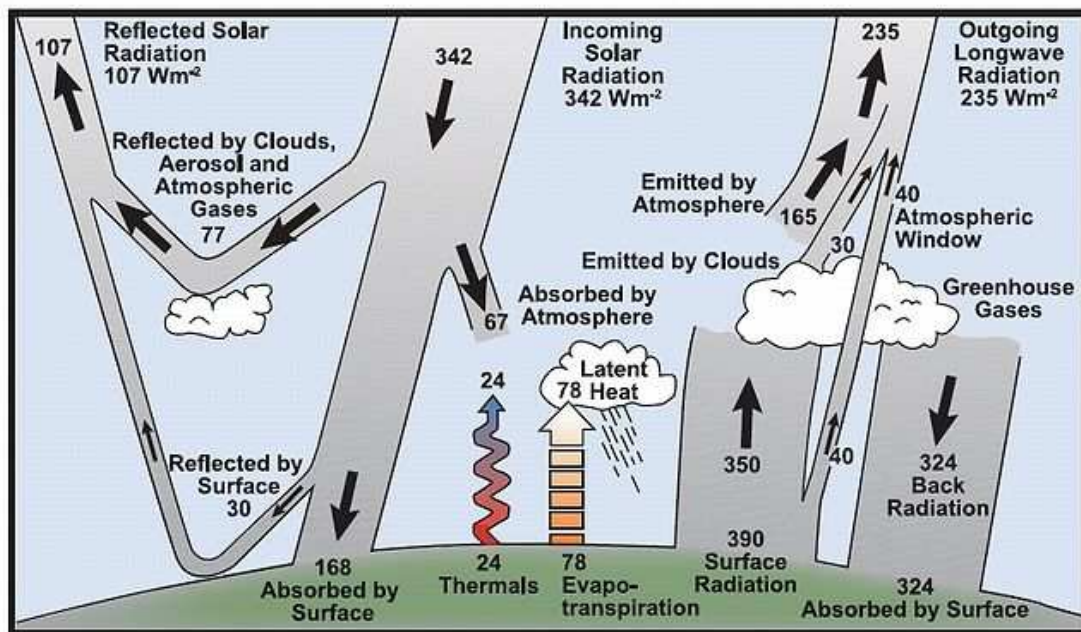
さて、地球の気候システムの概要を説明する上で従来の熱収支図と、ここに示した放射伝熱量を用いた表示方法の二つが考えられます。ではいずれが優れているのでしょうか？放射伝熱量を用いた表示方法では、実質的な熱移動量が一目で分かりますが、その反面、対象となる物体の温度についての情報が欠落してしまいます。気候を考える上で、温度と言う情報は非常に重要な要素であり、私は個人的には物質の温度と明確な（勿論近似的にですが）関係を示している放射強度を用いた従来の熱収支図の方がはるかに優れていると考えます。

最後に、本 HP で使用している熱収支図と IPCC 第 4 次報告書の図を示しておきます。冒頭に示した図とは多少数値が異なりますが、あくまでも熱収支の概略とご理解ください。



(数値出典: 日本気象協会報告書, 片山, 1975 年)

この図では、大気システムからの反射と地表面における反射をまとめて反射 30 と表記しています。



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).

この図の数値の単位は W/m^2 です。図の”Back Radiation”という言葉が『再放射』あるいは『逆放射』と表現していますが、この言葉が二酸化炭素地球温暖化仮説の考え方、それ故その限界をよく示していると考えます。第 4 次報告書の再放射の値 $324W/m^2$ は、

平均的太陽放射に対する相対的な表現を用いると $324/342 \approx 95$ となり、多少大きめに評価しているようです。

5. おわりに

CO₂地球温暖化仮説では、大気に含まれる CO₂による地表面からの放射の吸収と『再放射』によって地表面環境における大気温度が上昇すると説明されてきましたが、これは誤った解釈でした。

地表面放射は主に水蒸気 (H₂O) を中心とする赤外活性気体 (=温室効果ガス) によって吸収された後に、主に分子衝突によって窒素 (N₂) や酸素 (O₂) を主体とする大気全体にエネルギーが分配され、その他に地表面からの熱伝導や地表水の蒸発潜熱の放出による大気へのエネルギー供給と共に大気の温度状態を決定するのです。

赤外活性気体はこうして定まった温度状態によって決まる定常的な赤外線放射を行い、そのうち地表面にまで到達する大気放射が『温室効果』と呼ばれる現象の実態なのです。つまり、温室効果とは地表面放射の再放射 (Back Radiation) ではなく、大気自身の温度状態によって定まる大気中の赤外活性気体からの定常的な放射現象 (Atmosphere Radiation) なのです。

(2008.10.10)