

高校教科書と環境問題

1. オゾン層破壊フロン原因説 … 2

- 1-1 オゾンホールによる健康被害は存在しない
- 1-2 オゾンホールの成因は気象現象
- 1-3 フロン原因説
- 1-4 オゾンホールは杞憂

2. 人為的 CO₂ 地球温暖化 … 18

- 2-1 大気の温室効果とは何か
- 2-2 対流圏の温度分布はどのように決まるか
- 2-3 CO₂ 濃度の上昇の及ぼす影響
- 2-4 過去のデータや観測値における CO₂ 濃度と気温の関係
- 2-5 大気中 CO₂ 濃度はどのように決まるか
- 2-6 ヒートアイランド現象

3. 再生可能エネルギー … 59

- 3-1 工業生産の理論
- 3-2 発電
- 3-3 自然エネルギー発電と発電コスト
- 3-4 自然エネルギー発電規模の試算
- 3-5 固定価格買取制度の失敗

2012/10/30 版

1. オゾン層破壊フロン原因説

オゾン層破壊ないし南極のオゾンホール^①の拡大とフロンの関係は、いまだに仮説の域を出るものではありません。オゾン層破壊のフロン原因説は、代替フロンの特許を持つ化学メーカーが、冷媒市場を独占するために吹聴したということのようです。

1-1 オゾンホールによる健康被害は存在しない

(1) オゾンホールとオーストラリアの紫外線

40

地球環境問題 (○P.45)

私たちの課題

どうしてサングラスをかけているの?



△1 サングラスで登校する子どもたち

地球のバリア 地上から20～30km上空にかけてオゾン層がある。1気圧ではわずか3mmしかないが、太陽から降り注ぐ有害な紫外線を吸収して、地上に降らさないようにするバリアの役割を果たしているのである。

サングラスも「制服」の一部 オーストラリアは皮膚がんの発生率が高い。オゾンホール(オゾン層が局所的に薄くなっているところ)ができていいる南極に近いため、紫外線が強いなどの原因が考えられている。そのため、帽子や服、サングラス、日焼け止めクリームなどで日焼け予防をしている。

オゾン層破壊による影響

- ① 皮膚がん、白内障の増加
- ② 免疫機能の喪失
- ③ 地球規模の凶作による飢饉
- ④ プラクトンの激減による生態系の破壊など

1979年



2000年



△2 オゾンホール 南極上空におけるオゾンの量を示している。茶色の部分はオゾンの量が多く、青、白、灰色になるにしたがって量は少なくなる。(NASAのデータをもとに作成)

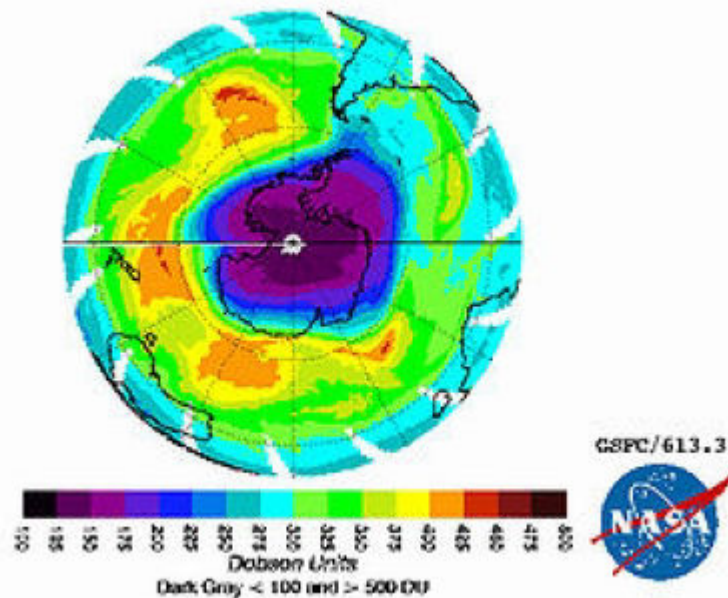
オゾン層を破壊し、地球の生態系を脅かすのがフロンである。身近な例ではスプレーのガス、クーラーや冷蔵庫の冷媒などに使用されてきた。先進国では、1996年以降特定フロンの生産は禁止されている。発展途上国も、2010年までに特定フロンを全廃することになっている。

確かにオーストラリアでは紫外線の影響を防ぐためにサングラスを着用させる学校もあるようです。しかしその理由が『オゾンホール(オゾン層が局所的に薄くなっているところ)ができていいる南極に近いため、紫外線が強いなどの原因が考えられている。』は明らかに事実誤認に基づく誤りです。

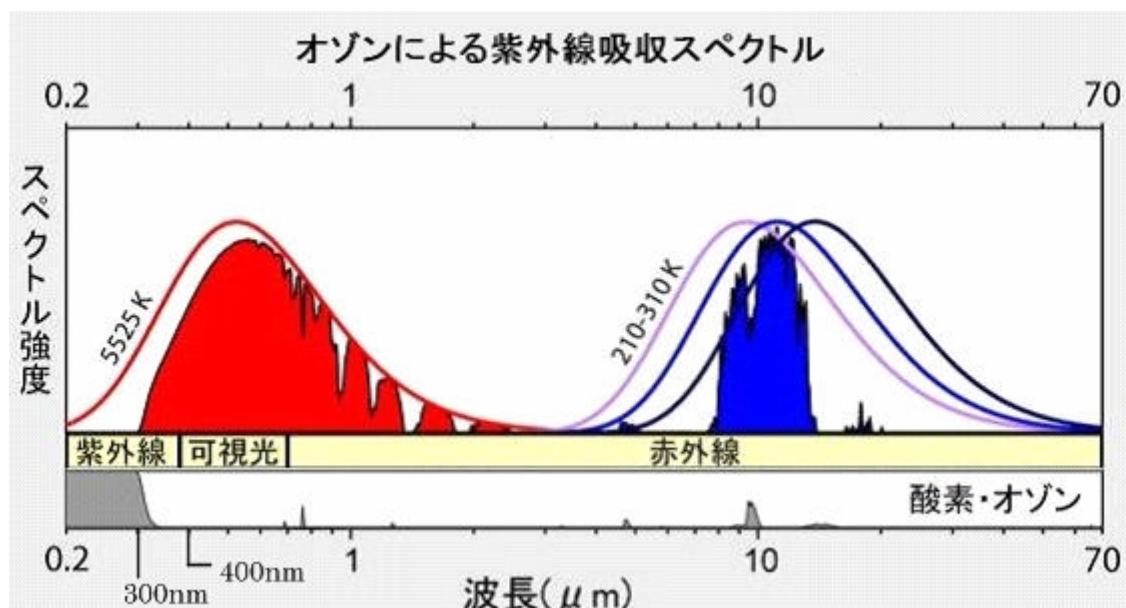
オゾンホールは南半球の春である9～11月の期間、南極上空のオゾン層のオゾン濃度が

一時的に低くなる現象です。オゾンホールが発生する範囲は最大でも南極圏（南緯 66 度 33 分～90 度）の範囲を超えることはありません。しかもこの春先の時期の太陽高度は低く、太陽光の入射角度はオゾンホール面に対してほとんど平行であり、オゾンホールを通過して地表面に降り注ぐ紫外線はほとんどありません。

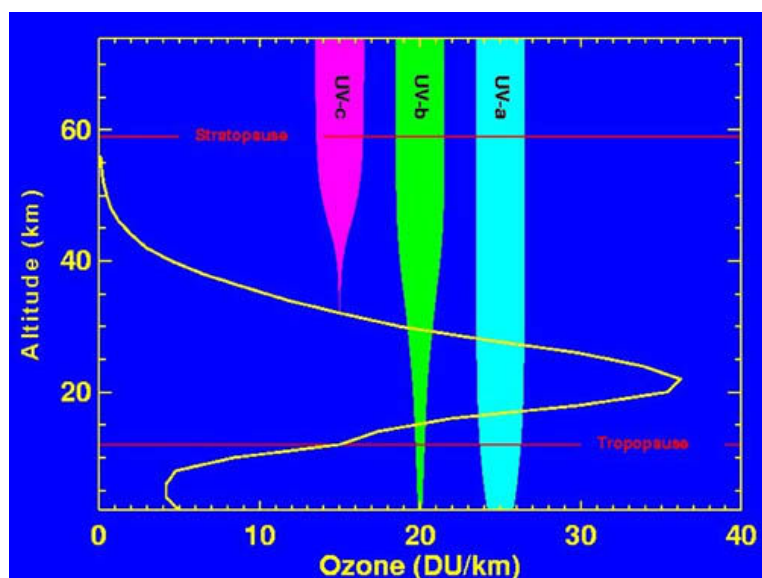
EP/TOMS Corrected Total Ozone for Oct 1, 2004



南極圏から遠く離れた南半球の中緯度（南緯 10～45 度程度）に位置するオーストラリアに降り注ぐ紫外線と南極のオゾンホールには何の関係もありません。上図から分かるように、南半球の春のオゾンホールからオーストラリア南端の間の地域はむしろオゾン濃度が極めて高い地域です。オーストラリア上空のオゾン層は平均的なオゾン濃度を有しており、オゾン層の破壊やオゾンホールとは無関係です。



前項の図に示すように、オゾン層は紫外線の内の UV-C（波長 200～280 nm）と UV-B（280～315nm）の一部を吸収します。UV-A（315～400nm）はオゾン層に吸収されることはありません。地球の大部分の地域では UV-A と UV-B の一部が地表まで到達しています。地表に到達する紫外線には、殺菌作用やビタミン D の生成（UV-B）などの有用な効果があります。



オゾン O_3 は、成層圏で酸素 O_2 が UV-C のエネルギーを吸収して酸素原子 O に分解され、これと O_2 が反応することで合成されます。オゾン層が成層圏にできるのは、現在の下層大気の O_2 濃度が高すぎて UV-C が成層圏までしか到達できないからです。

高校現代社会の教科書では、オゾン層破壊の影響として 4 項目が挙げられています。

①皮膚がん・白内障の増加については、UV-C が地表にまで到達するようになれば波長 250nm 付近の紫外線をよく吸収する生物の DNA を破壊し、遺伝子に異常を引き起こしガンなどが増加する可能性があります。また、UV-B の透過量が極端に増加すれば白内障が増える可能性があります。しかし、オゾン層のオゾン濃度が顕著に減少するのはたかだか南極圏の春だけであり、もともと紫外線量が極めて少なく全く問題になりません。南極圏以外の地域においてオゾン濃度の低下は認められず、皮膚がん・白内障の増加を心配する必要はありません。

②免疫機能の喪失、③地球的規模の凶作による飢饉③プランクトンの激減による生態系の破壊については、全地球規模でオゾン濃度の顕著な低下が常態化し、UV-C までが地表面に大量に到達することでもない限り起こり得ないことです。現実には南極のオゾンホール以外にオゾン濃度が著しく低い地域は観測されていません。波長の短い UV-C が地表にまで大量に降り注ぐことは考えられません。

(2) オーストラリア人になぜ皮膚がんが多いか

オーストラリア人に皮膚がんが多いのは事実です。しかし注意が必要なのは、ここでいうオーストラリア人とは、ネイティブのアボリジニの人々ではなく、西欧から移住した白人の祖先たちだということです。

ヒトの肌の色は紫外線の強さによって大きな幅があります。一般的に低緯度側に住む人種ほどメラニン色素の量が多いのです。これは長い年月をかけて獲得した有害な紫外線に対するヒトの防御機能です。

白人系のオーストラリア人は、メラニン色素の生産能力が小さく紫外線に対する耐性が弱い人種です。外見的には肌の色が白く、虹彩（ひとみ）の色が薄いのが特徴です。その結果、紫外線の影響を受けやすく、皮膚がんや白内障を発症しやすいのです。

この点について「日本光線療法協会」の記事を紹介しておきます。

オーストラリアでは

紫外線カット商品を扱う企業がマスコミなど広告媒体の特集記事で紫外線は皮膚がんの原因と決め付ける際に使う常套句は、紫外線（UV）対応策の先進国、オーストラリアでは云々です。例えばオーストラリアで皮膚がん予防キャンペーンとして、皮膚がんになる要因に小児期からの習慣的日光暴露があるため、白人の子供に義務づけている紫外線対策は、外出時は日焼け止めクリームを塗り（スロップ）、つばの広い帽子をかぶり（スラップ）、長袖の上着を着て（スリッ プ）、サングラスをかける（ラップ）というのがあります。

このオーストラリアで行われている紫外線対応策を紹介した記事を参考にして、ある幼稚園で園児のお母さんに、外出時には紫外線をカットする素材で出来ている衣服を着せ、首筋まで隠れる帽子をかぶらせ、日焼け止めクリームを塗るように勧めているそうです。また乳母車に乗った赤ちゃん、いわば日傘を差した小さなお子さんにも日焼け止めクリームを使っているお母さんがいますが、共通しているのはオーストラリアの紫外線対応策を取り入れていることです。

ところで私たち日本人はオーストラリアの白人のように紫外線を皮膚がんの原因として怖がる必要はあるのでしょうか？実は人種の肌色を決める皮下の基底細胞層のメラニン形成細胞の細胞密度に人種の違いによる差はないことが分かっています。それなのに人種で肌色が違うのは、アフリカで誕生した人類が世界各地に移り住む過程で、紫外線量に応じて、メラニン形成細胞がメラニン色素を産生する能力に違いが生じたためなのです。すなわち黒人は熱帯の強い紫外線から肌を守るため、メラニン色素を濃くすることで紫外線を遮断し、皮膚細胞の障害、がん化を防止しますので、紫外線による皮膚がんには殆ど罹りません。亜熱帯に住む黄色人種は、紫外線が強い夏に紫外線による皮膚細胞の遺伝子の損傷を防ぐ皮膚防護層を作るため、メラニン形成細胞が働いてメラニン色素を生成し日焼けをしますので、紫外線による皮膚がんの患者は余りいませ

ん。紫外線量の少ない寒帯の白人は、弱い紫外線でビタミンDを生成するためメラニン形成細胞は働かずメラニン色素を産生しないので日焼け出来ないのです。その白人が強烈な紫外線が降り注ぐオーストラリアに移住したのですから、紫外線による皮膚がんが多発したのです。言うまでもなく、日本人はオーストラリアに移住した白人のように紫外線を怖がる必要はありません。

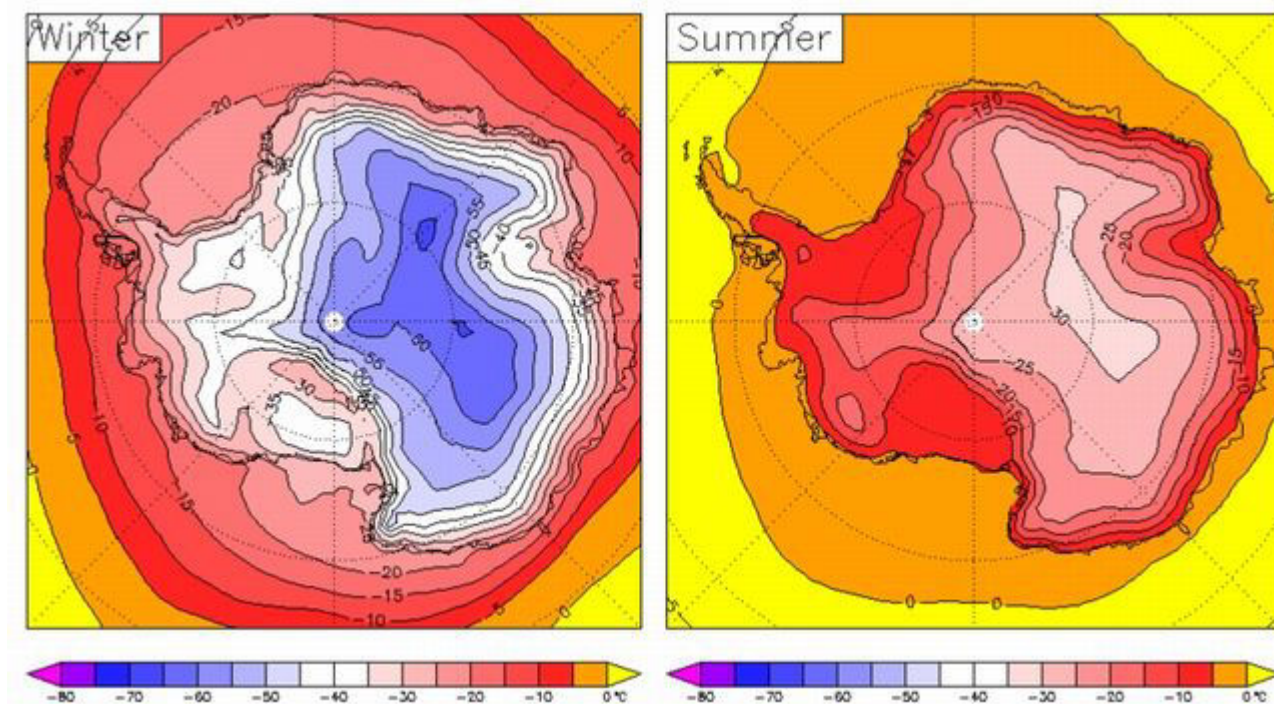
むしろ今の子供たちは、一昔前の子供と比べると外で遊ぶ時間は激減していますので、時に外で思いっきり遊ばせてください。そうすることでビタミンDを不足なく生成し、骨や筋肉の健全な生育を促し、外界の微生物に接し体内に取り込むことで免疫力、抵抗力を高めるのです。なお日焼け止めクリームのような UV 化粧品が皮膚がん急増の原因とする研究報告もありますので、肌が弱い小さなお子さんには使わない方が無難です。

まさに現代社会の教科書の記述は、ここに紹介されたオーストラリア人における紫外線による皮膚がん、白内障に対する誤った認識を引用したものです。

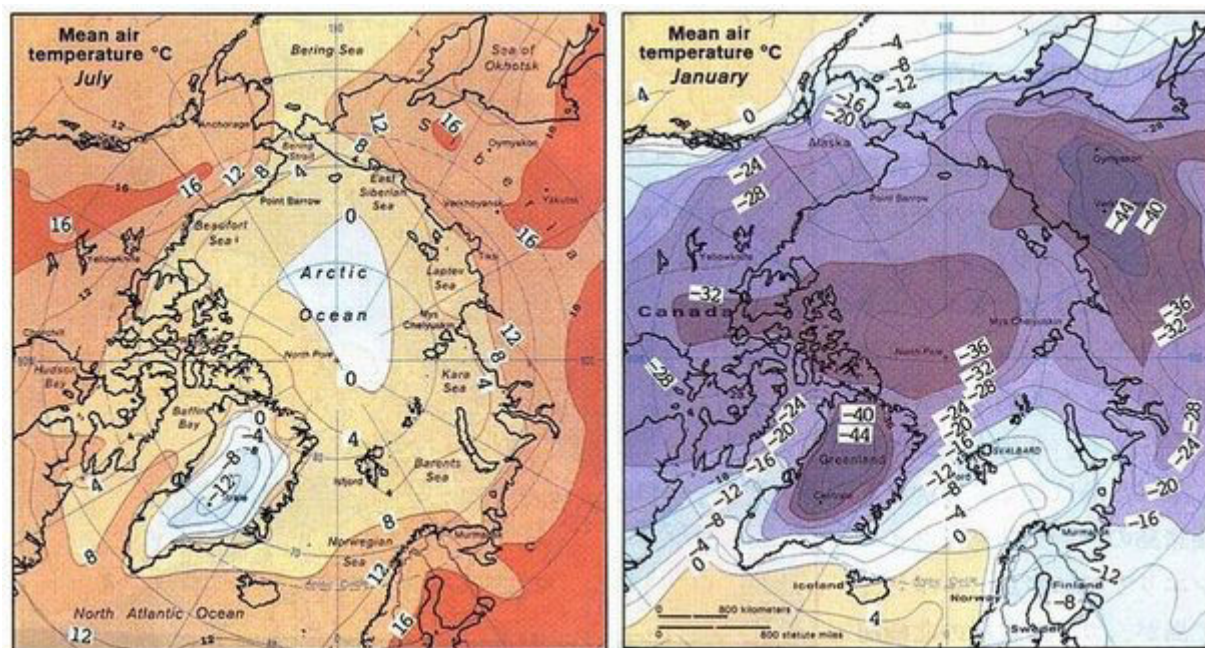
しかも教科書の記述では、オーストラリア人の皮膚がんや白内障があたかもオゾンホール出現によって急増したような印象操作まで行なって、オゾンホールの脅威を徒に煽っています。これは科学性に基づいて記述すべき教科書として極めて不適切だと言わなければなりません。

1-2 オゾンホール成因は気象現象

少し視点を変えて、オゾンホールがなぜ南極にだけ生じるのかを考えます。南半球は海洋の割合が大きく、南極は周囲を海によって隔てられた孤立した大陸です。その結果、冬の南極は北極に比べて著しく低温であり、大気循環は単純な形になります。



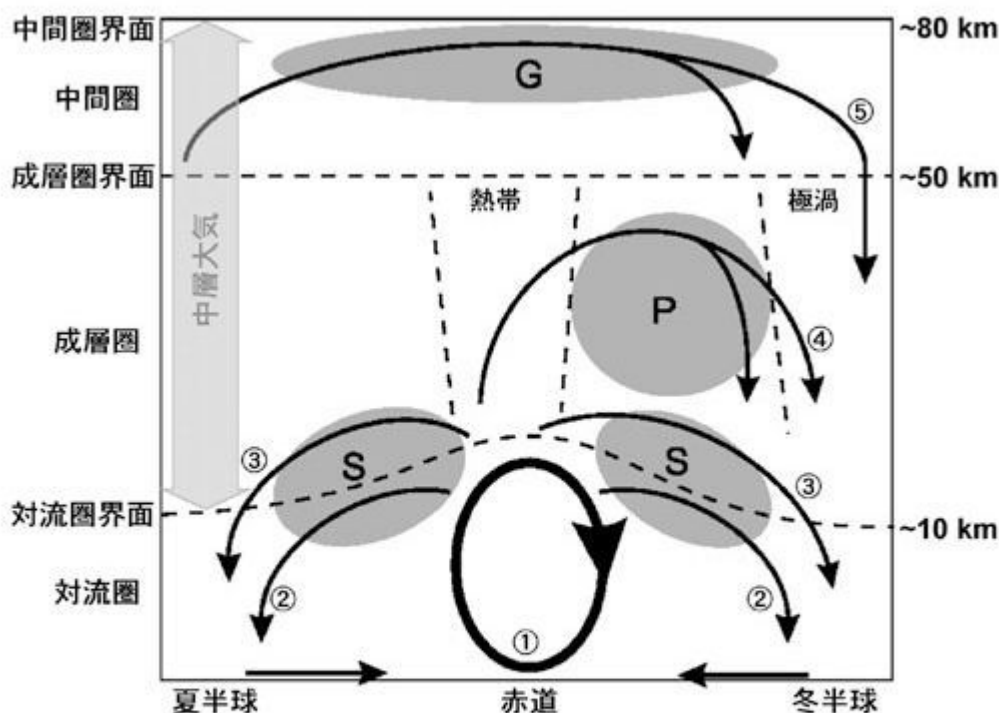
南極の気温分布: 孤立した大陸である南極周辺の気温分布は単純であり、北極に比較してはるかに低温となる。



北極の気温分布: 極点付近には陸地が存在せず、最低気温はより低緯度の陸地において分散して観測される

前述の通り、オゾン層は成層圏大気中の O_2 が紫外線（UV-C）を吸収することで O_3 を合成することによって出来るのです。冬～春先の南極上空では、太陽光の入射角度が小さく、波長の短い紫外線である UV-C は大気によって散乱されて届かないため、 O_3 は生成しません。しかし低緯度上空や北極で作られた O_3 が中層大気の循環によって南極上空に供給されるために冬季にオゾンホールは生じません。

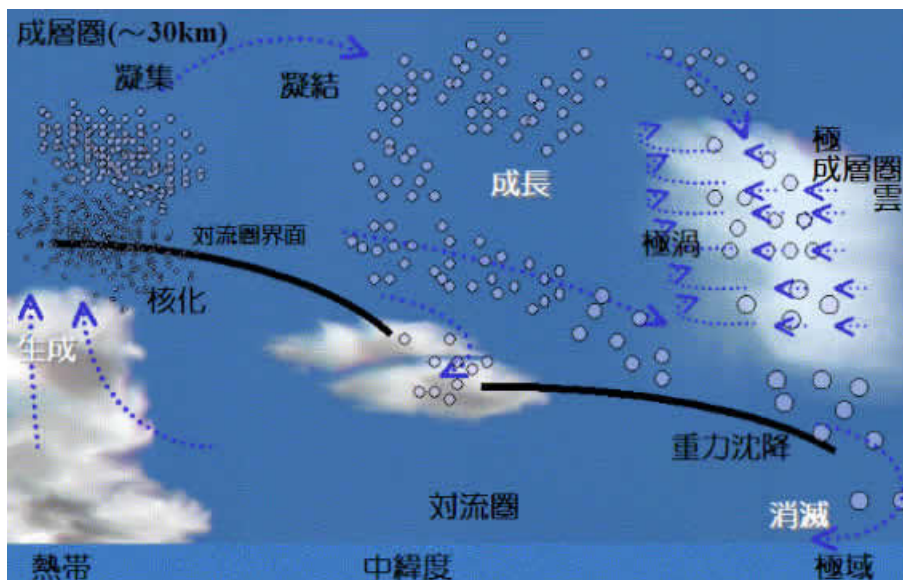
図1. 緯度方向の物質輸送(子午面循環)の模式図



対流圏の赤道付近の太い矢印で示された輸送は、太陽放射過熱により駆動される物質輸送(ハドレー循環)。細い矢印で示された輸送は、様々な種類の大気波動によって駆動される輸送を表している。それぞれの輸送の駆動源になっている波動をS(総観規模擾乱), P(プラネタリー波), G(大気重力波), それぞれの碎波領域は灰色で示した(2002年気象集誌, Plumb博士の論文の図(Plumb, 2002., Figure 2)を日本語化し加筆した)。

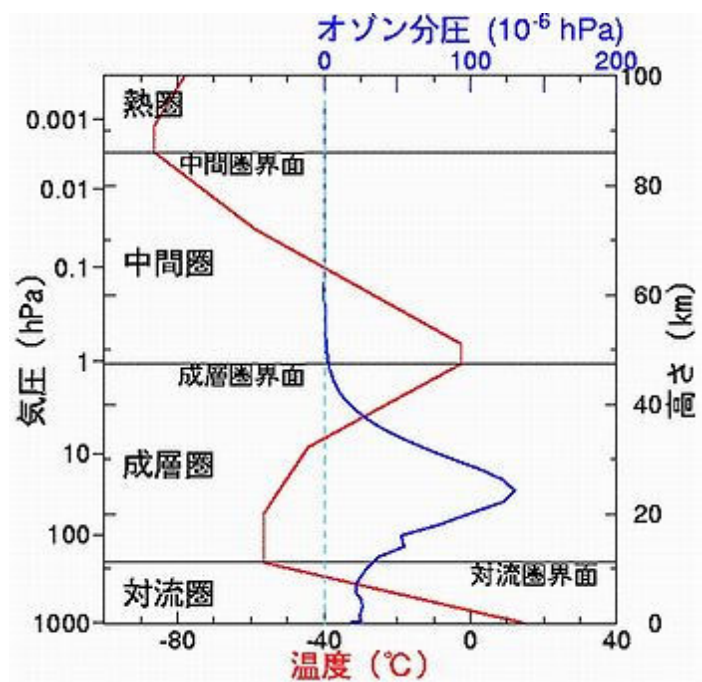
しかし、春先になると南極上空への大気の流入が減少するために、 O_3 の供給量は減少します。さらに春先には極成層圏雲が成長し空気塊とともに落下し、これにともなって成層圏上層の O_3 の希薄な大気が落下するためにオゾン層のオゾン濃度が低下するのです（次頁参照）。このように、南極のオゾンホールの主要な成因は南極特有の気象現象なのです。

北極の冬は、南極に比較してとても暖かであり、複雑な地形・気温分布のために大気循環は乱され南極ほど単純ではないため、極成層圏雲はそれほど発達せず、極点付近の下降気流もそれほど顕著ではありません。その結果南極ほど顕著なオゾンホールは形成されないものと考えられます。



極成層圏雲の成長と消滅過程

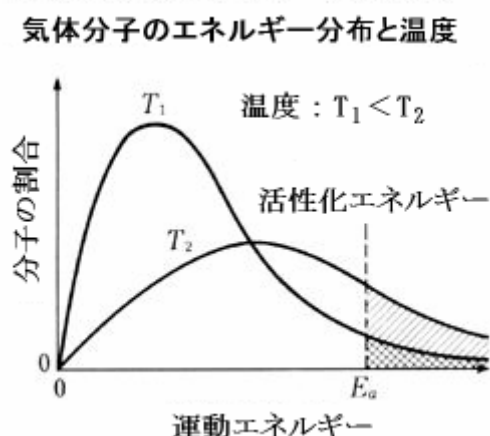
極成層圏雲の形成過程はまだ不明な部分も多いが、成層圏において硫酸・硝酸・水の三成分系液滴からなるエアロゾルが熱帯上空から冬極に輸送されながら成長し、 -80°C 程度の低温になることで極成層圏雲として成長し、これが対流圏に落下して消滅する。



オゾン分圧の鉛直分布

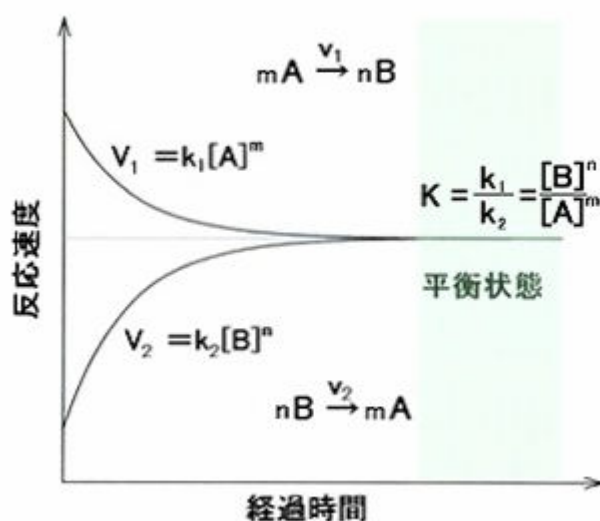
1-3 フロン原因説

オゾン層破壊フロン原因説では、南極上空のオゾン層において、対流圏では安定であるフロンが成層圏で紫外線によって分解し、遊離した塩素ラジカルの触媒反応によってオゾン O_3 分解反応を促進すると主張します。しかし、この仮説には無理があります。

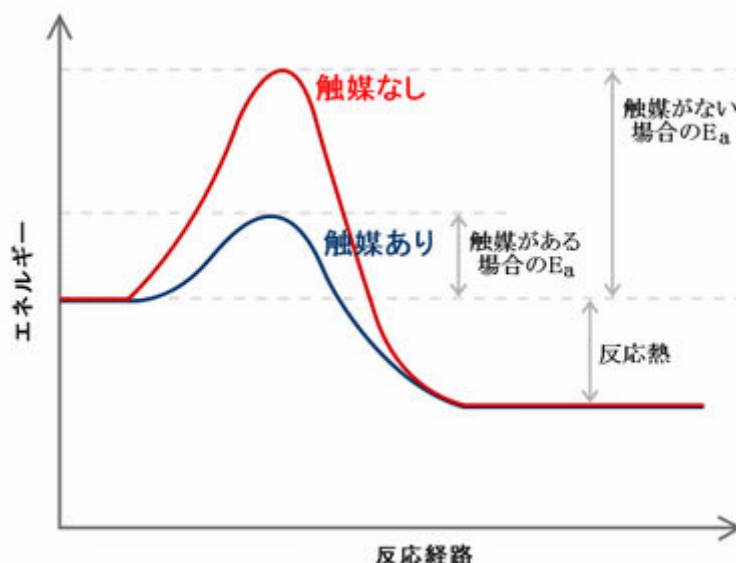


フロンの分解反応、 O_3 の分解反応にはともに紫外線 (UV-C) が必要ですが、冬から春先の南極上空には紫外線は届かず、しかもオゾン層の気温は氷点下 $80^{\circ}C$ というごく低温です。このような環境においてフロンや O_3 の分解反応が急速に進むというのは考えにくいことです。

成層圏では O_2 が波長 $242nm$ 以下の紫外線を吸収することで酸素原子 O となり、これと O_2 が結合して O_3 を合成する反応と、 O_3 が波長 $240nm \sim 320nm$ の紫外線を吸収することで O_2 と O に分解する逆反応が同時進行しています。この 2 つの反応が平衡状態に到達した時の O_2 と O_3 の存在比率は、成層圏の環境条件 (温度、気圧、紫外線量など) によって決まるのであって、触媒の有無には無関係です。



触媒は化学反応の活性化エネルギー E_a を小さくすることで反応速度を大きくし、平衡状態に到達する時間を短縮します。



塩素の触媒としての効果が O_3 を分解する方向で大きな効果を持つのは、成層圏の環境条件によって決まる O_2 と O_3 の平衡状態に比較して、 O_3 が異常に高い割合で存在する非平衡状態にある場合です。これは南極の冬に低緯度地域や北極から O_3 が大量に流入する場合に当てはまります。しかし、この時期には南極上空に紫外線が届かないため、フロンの分解反応、 O_3 の生成・分解反応は起こらず、塩素の触媒効果は無効です。

春になると O_3 の流入が減少するため、平衡状態からのずれは小さくなり、塩素による O_3 の分解促進効果は小さくなります。また、オゾンホールが極大を示す春先には紫外線量は少なく、フロン分解反応、 O_3 の生成・分解反応が急速に進むことはありません。

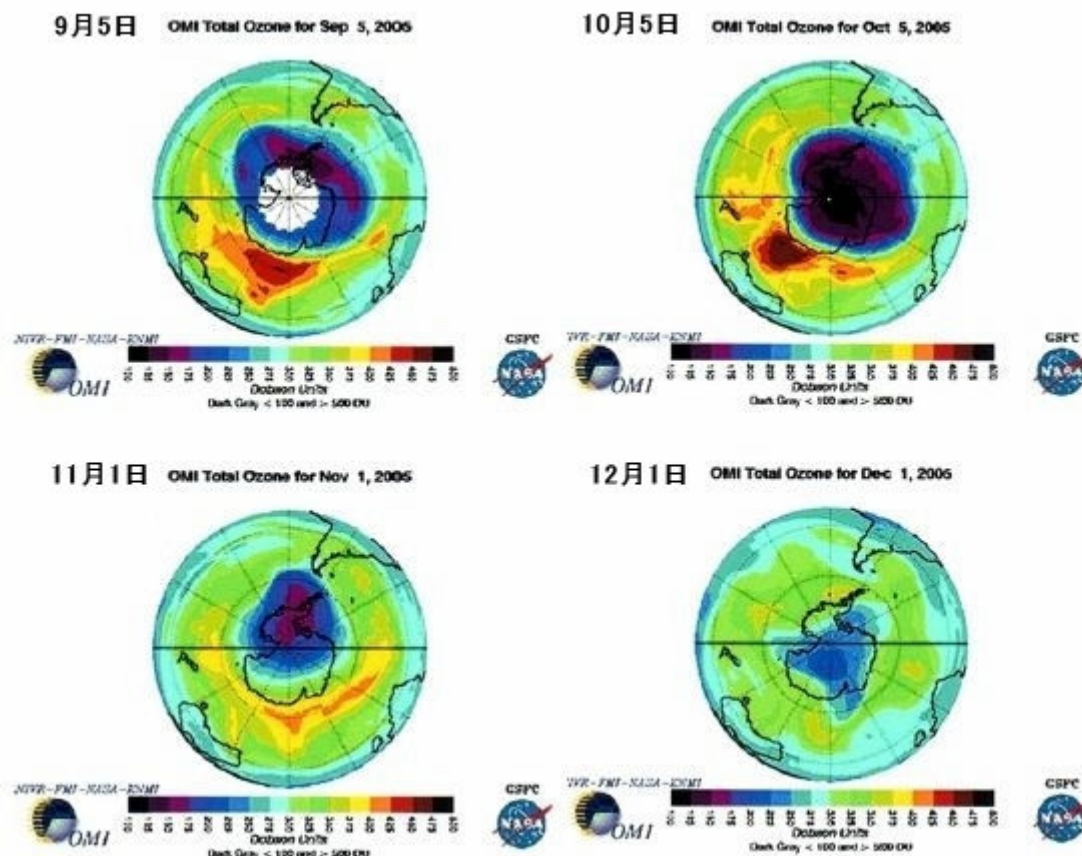
地球の大気は全球規模で絶えず循環して攪拌されています。南極上空が極渦によって閉ざされた反応槽のようにフロン起源の塩素を蓄積し、その触媒効果で一方向的に O_3 が分解され、それが主因となってオゾンホールができるとは考えられません。南極上空の対流圏界面から成層圏では低緯度側から吹き込む西風で極渦が形成され、地表付近で極東風として低緯度側に吹き出しています。南極上空の大気は閉ざされてはいないのです。

次頁に 2005 年の 9～12 月の南極のオゾンホールの状況を示します。オゾンホール（オゾン全量が 220DU 以下の範囲）は既に 9 月初旬に現れています。

この時期は春分（9 月 23 日頃）以前であり、南極圏上空に紫外線が到達することはありません。この時期に既にオゾンホールが形成され始めていることを考えれば、少なくともオゾンホール形成初期の成因は紫外線による O_3 分解反応に対するフロンの分解によって供給される塩素ラジカルの触媒効果ではあり得ません。

10 月初旬から中旬にオゾンホールの面積は極大値を示します。この時期は春分直後であり、南極圏に侵入する太陽光の高度は小さく、短波長の紫外線はレーリー散乱で南極圏上

空に十分届くことはありませんから、 O_3 の生成・分解反応、とりわけ分解反応だけが急速に進むことは考えられません。しかし、この時期には中層大気の循環が弱まり、次第に逆転するため、北極・低緯度地域からの O_3 の流入がなくなり、しかも南極成層圏では O_3 はほとんど生成しないために必然的に O_3 濃度は小さくなります。



10月中旬以降、次第に紫外線量が増加するに従ってオゾンホールは縮小し始め、12月初旬までに消滅します。これは紫外線量の増加にともなって O_3 の合成反応が進行することで、次第にオゾン全量が回復するからだと考えられます。

仮に、南極のオゾンホールの主要な成因がフロン起源の塩素の触媒効果による O_3 の分解反応の促進にあると仮定してみます。

次頁の図は、オゾンホールのコア部分の最も O_3 濃度の薄くなる部分のオゾン全量の年変化の模式図を示します。黒の実線で示すコア部分のオゾン全量が 220DU を下回る 8月中旬がオゾンホールの発現する時期に対応し、220DU を上回る 11月下旬がオゾンホールの消滅時期に対応します。

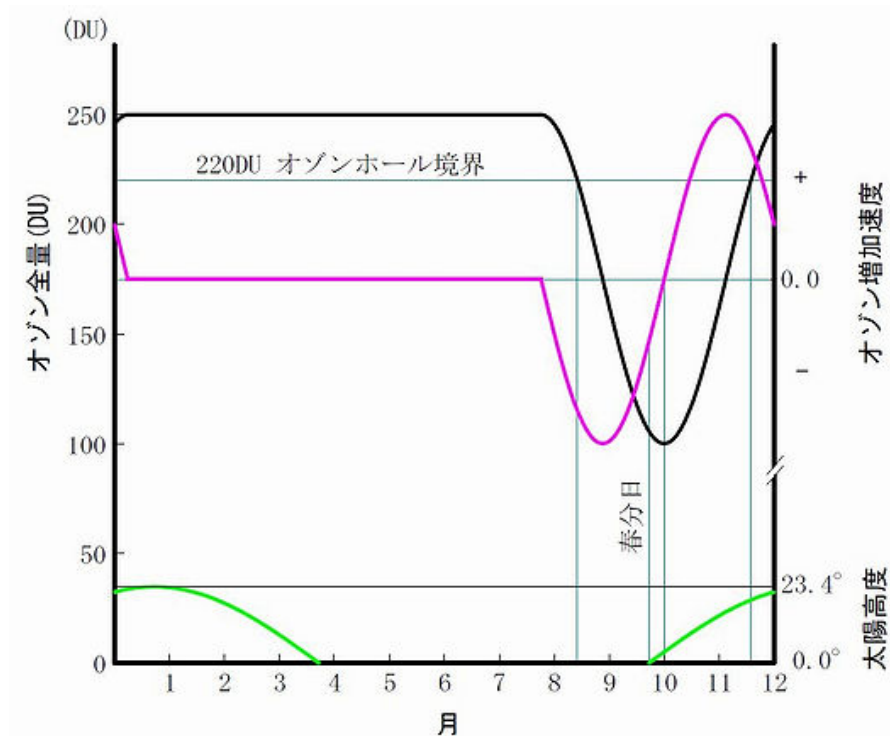
桃色で示す実線はオゾン全量の時間に対する微分係数＝大気中のオゾンの増加速度を表します。成層圏大気中では UV-C のエネルギー ($h\nu$) を吸収して O_3 の合成反応と分解反応が同時に起きています。



O_3 の合成反応速度を v_1 、分解反応速度を v_2 とおくと桃色の実線で示す値 v は

$$v = v_1 - v_2$$

$v=0$ の場合は、合成反応と分解反応が平衡しており、オゾン全量が増加しないことに対応します。 $v<0$ の場合は、分解反応が卓越するため、オゾン全量は減少局面になります。同様に $v>0$ の場合は合成反応が卓越し、オゾン全量は増加局面になります。



オゾン全量が極小値＝最小値を示す9月下旬から10月初旬では、 $v=0$ 、つまり O_3 の合成速度と分解速度は平衡しているのです。

オゾンホールの主要な成因がフロン起源の塩素の触媒効果による O_3 分解反応の促進だとすると、9月下旬の春分を過ぎて、これからようやく UV-C が南極点にも届き始めるという時期から O_3 の分解反応速度が急速に大きくなるはずですが。

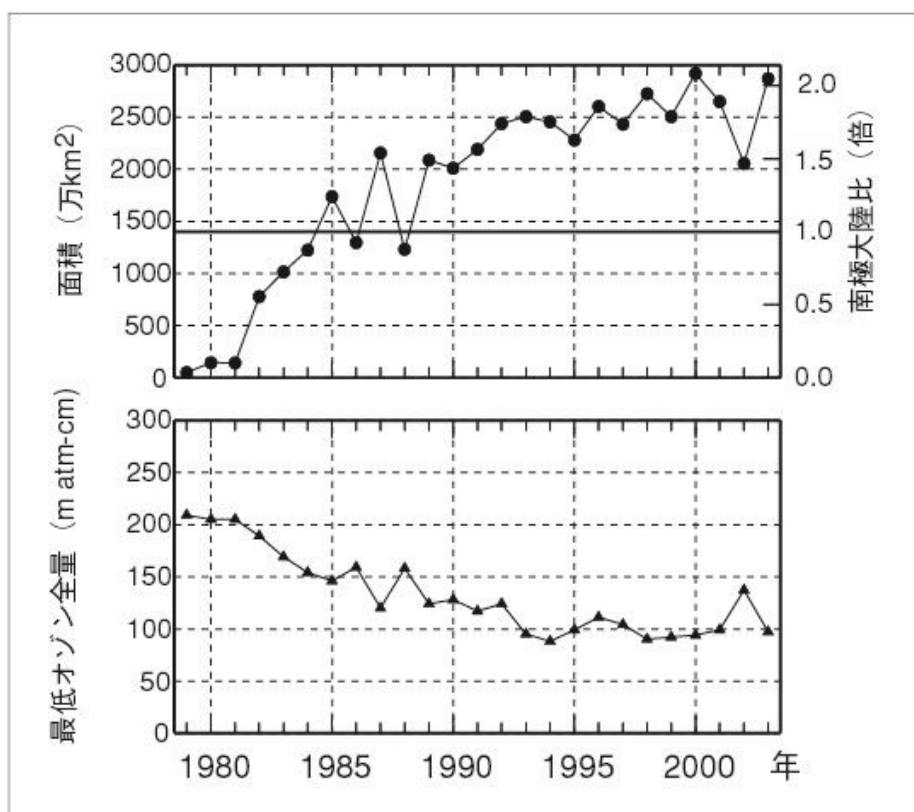
実際には、まだ南極点には UV-C が到底届くはずのない8月下旬から9月初旬に O_3 の減少速度は最大になり、春分を過ぎると O_3 は増加局面になるのです。

以上から、南極オゾンホールの成因は、 O_3 の化学的な分解反応では説明できず、大気の流れや極成層圏雲の落下などの大気循環が主要な成因だと考えられます。

春分直後の南極点は、オゾンホールという異常に O_3 濃度の減少した状態にあり相対的に O_2 濃度が高いため、UV-C が到達し始めると反応速度平衡を回復するために O_3 の分解反応速度 v_2 よりも合成反応速度 v_1 のほうが卓越することになり、オゾン全量は急速に回復すると考えられます。オゾン全量が回復する局面では UV-C による O_3 の化学的な合

成反応が重要な役目を果たすものと考えられます。

図表7 オゾンホール面積（上段）、オゾンホール内最低オゾン全量（下段）の推移（1979年～2003年）⁴⁾



オゾンホールの大きさは上図に示すように単調に拡大しているわけではなく、かなり激しく増減を繰り返しています。このような激しい不規則変動を示す現象をフロン起源の塩素の触媒としての影響で説明することは不可能です。あるいは南極上空の気象現象の激しい経年変化から分離してフロンによるオゾン層破壊の影響を検出することは不可能です。

フロンが分解してできた遊離塩素ラジカルによるオゾン層“破壊”という現象が実在するとした場合、ではなぜ中低緯度成層圏においてはオゾン層の顕著なオゾン濃度低下が観測されないのでしょうか？中低緯度成層圏では年間を通して紫外線が存在するだけでなく、成層圏の温度も南極上空に比べて高く、オゾン分解反応にとってはるかに好条件が揃っていると考えられます。

オゾン層破壊フロン原因説が登場した当初、当然ながら南極ばかりでなく全球にわたってオゾン層が破壊されることが危惧され、北半球の中低緯度でもオゾン層が破壊され皮膚がんが増加することが予測され、その結果としてフロンの製造中止が国際的に取り決められました。

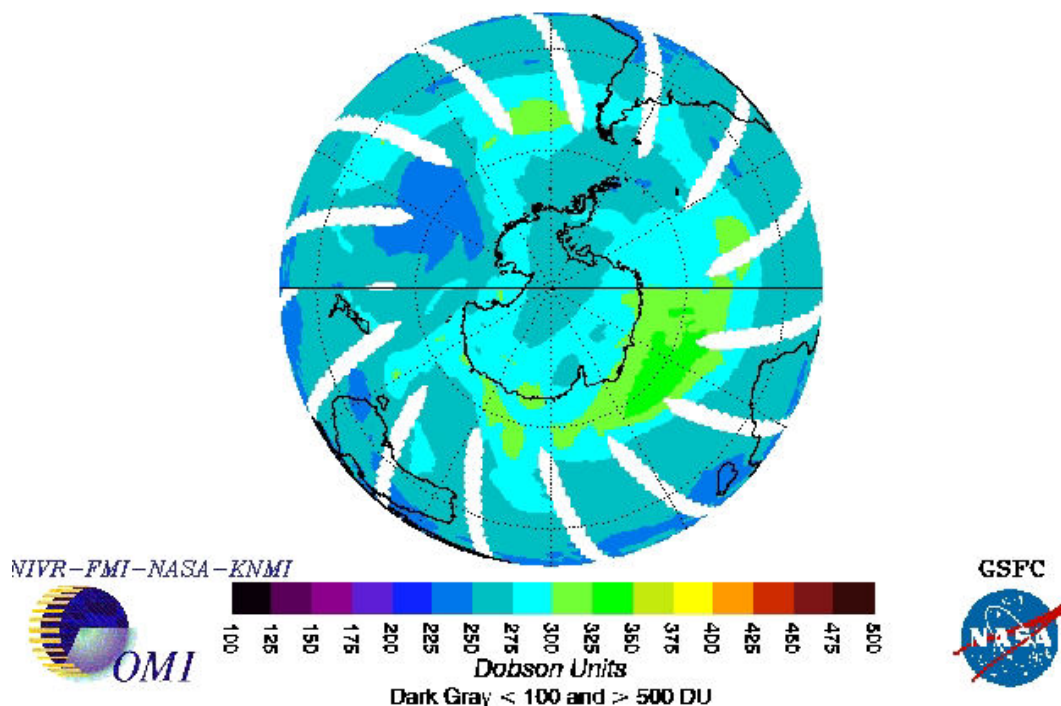
しかしオゾンホールは南極以外に拡大することはなく、杞憂であることが確認できました。そしてこの所、「フロンによるオゾン層破壊は終息しつつある」という無責任な論評があちこちで上がっています。しかし冷静に考えれば、そもそもオゾン層破壊フロン原因説というものの自体が誤りであり、虚像であったにすぎない考えるのが最も合理的です。

フロンによるオゾン層の破壊という問題は既に国際政治における環境問題の主要課題ではなくなり、『過去の問題』として忘れ去られようとしているのです。今の国際社会はフロンという魔女は必要なくなったのです。

しかし、この問題は槌田敦が主張するように（『フロンは魔女ではない』日本物理学会 2005.9.22）自然科学の問題としては、徹底的に検討して結論を出すべき問題です。また、未来を担う高校生たちには、ある化学メーカーの利益拡大のためにエセ科学が悪用された事実を教訓として伝え、オゾンホールの原因を徹底的に科学の視点から明らかにすることこそ必要だと考えます。

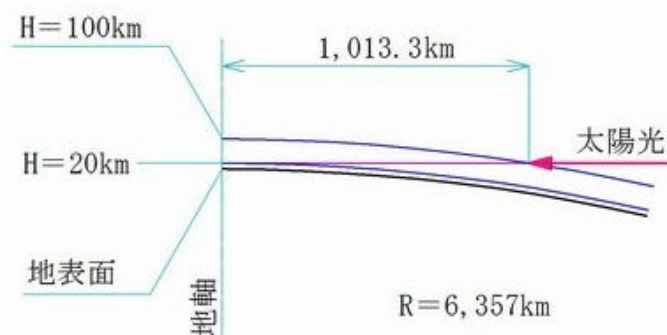
1-4 オゾンホールは杞憂

OMI Total Ozone for Mar 1, 2012



オゾン全量は1気圧の下で何センチメートルの厚さになるかを、1/1000cm を1として表し、単位は $\text{m atm}\cdot\text{cm}$ (ミリ・アトム・センチメートル) あるいはこれを DU (ドブソンユニット) と表します。通常、オゾンホールとはオゾン全量が 220DU 未満の部分の指します。図のカラースケールでは濃い青色で示す 225DU よりオゾン全量が少ない範囲と考えればよいでしょう。夏の極地方は最もオゾン濃度が高い時期ですから今年の3月1日現在では南半球には、当然ですが、オゾンホールは存在しません。

図からわかるように、地球の大部分の地域ではオゾン全量は 250~300DU 程度の範囲にあります。250DU 程度のオゾン全量があれば日常生活において危険な紫外線は十分に遮蔽されていると考えられます。



春分日における太陽光の大気中透過距離

紫外線を含めて光線は媒質の中を直進します。これを考えれば、オゾン層の厚さとして

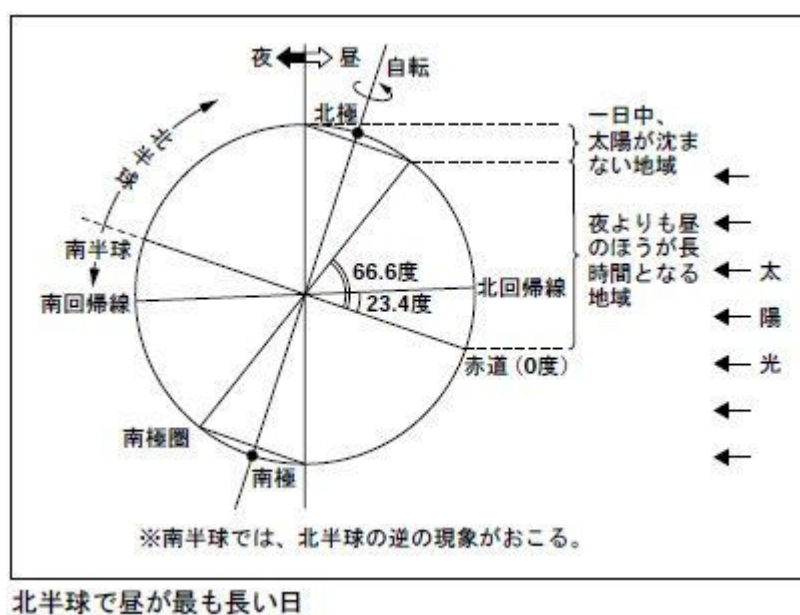
必要なのは紫外線の進行方向の厚さです。低緯度地域では、オゾン層の厚さ≡紫外線の通過するオゾン層の厚さと考えてよいでしょう。しかし、高緯度地域では緯度の影響を考慮しなければなりません。

前頁の図に示す春分日では、大気厚を 100km とした場合、南極点上空 20km に到達する太陽光は大気中を 1,000km 以上も透過しなければなりません。波長の短い UV-C はレイリー散乱（22 頁参照）の影響で到達することは不可能です。

南極点で最も太陽高度が高くなる夏至（12 月 22 日頃）までオゾンホールが存在していると仮定します。南極点におけるオゾン全量を 100DU だとします。南極点における夏至の南中時の太陽高度は 23.4°です。この場合、南極点に向かう紫外線の通過するオゾン層の厚さは、

$$100\text{DU} \div \sin 23.4^\circ = 252\text{DU} > 220\text{DU}$$

ですから、危険な紫外線を遮蔽するには十分な厚さということになります。

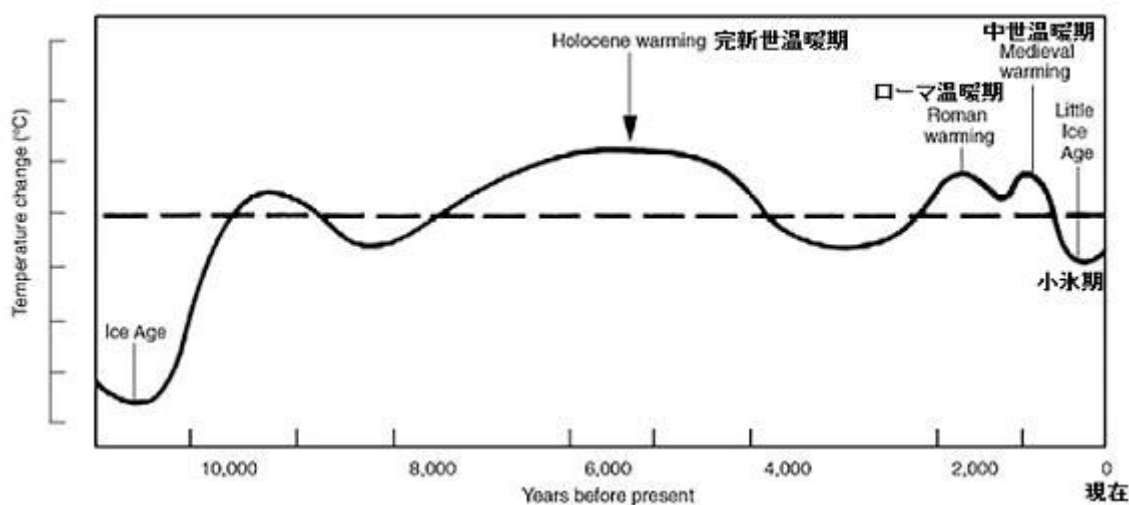


なぜこのような当たり前の検討がなされていないのでしょうか？オゾンホールという言葉の語感に誤解を抱かせる原因があるのかもしれません。オゾンホールといえどもまったくオゾンがなくなるわけではなく、最低でも 100DU 程度のオゾンが存在するのです。低緯度から中緯度地域においてオゾン全量が半減すれば 確かに問題が起こるかもしれませんが、極地方で多少オゾン全量が減ったとしても危険なレベルにまで紫外線が増加することなどあり得ないのです。たとえ南極点に沢山人が住んでいたとしてもオゾンホールによる健康被害などというものは実在しないのです。

2. 人為的 CO₂ 地球温暖化

高校教育で取り扱う環境問題の中で、現在最も多くの教科において悪影響を与えているのがこの地球温暖化の取り上げ方でしょう。

歴史的に見ると、完新世に入ってから、古代文明の起こった 6000 年前を中心に長い高温期（現在との相対的な比較においてという意味で。）があり、直近では 1000 年ほど前を中心に中世温暖期があり、その後 14 世紀から 19 世紀にかけては小氷期と呼ばれる低温期があり、その後現在まで気温回復＝上昇傾向が続いているというのが事実です。



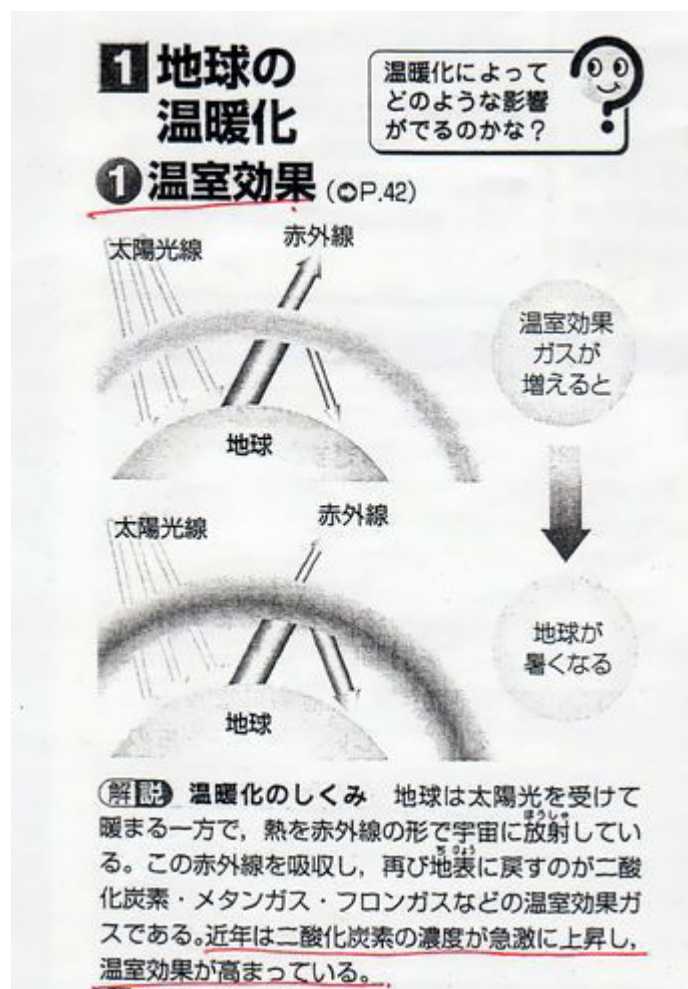
この歴史的事実について、「前世紀から現在まで気温が上昇傾向にある」＝地球温暖化であるということにはまったく異議はありません。

ところが、高校教育の社会科や理科の教科書ではこの気温の上昇傾向を、『①産業革命以後に化石燃料の燃焼によって人為的に大気中に放出された CO₂ が蓄積したことによって大気中の CO₂ 濃度が急激に上昇し②CO₂ の温室効果の増大によって気温が上昇し③生態系に対して驚異的な悪影響を及ぼす』と説明しているのですが、これはまったく科学的な根拠のない政治的なプロパガンダであることが重大な問題なのです。

論理性や科学性が求められる学校教育において、それを担う教師たちがこの出鱈目をそのまま教えているというのは重大な犯罪ではないかと考えています。あるいは高校の教師とはそれほど無能な人々なののでしょうか？

現代社会の教科書に掲載された温室効果による地球温暖化の説明図から始めることにします。

2-1 大気の温室効果とは何か



高校の化学や物理では分子の構造や、気体の状態方程式について学んでいます。それを前提にもう少しだけ検討をすすめることにします。

現代社会の教科書では「この赤外線を吸収し、再び地表に戻るのが二酸化炭素・メタンガス・フロンガスなどの温室効果ガスである。」と説明されていますが、本当でしょうか？

(1) 分子運動と気体の状態方程式

1 気圧 0°C において 1mol の気体の体積は

$$22.4 \text{ リットル/mol} = 2.24 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{mol} = 2.24 \times 10^{25} \text{ nm}^3/\text{mol} \quad (\text{ただし } \text{nm} = 1 \times 10^{-9} \text{ m})$$

一方、 1mol に含まれる気体分子数は 6.02×10^{23} 個/mol です。仮に大気を構成する気体分子が種類に関係なく均等に拡散しているとすれば、

$$2.24 \times 10^{25} \text{ nm}^3/\text{mol} \div (6.02 \times 10^{23} \text{ 個/mol}) = 37.21 \text{ nm}^3/\text{個} = 3.34^3 \text{ nm}^3/\text{個}$$

つまり、一辺が 3.34nm の立方体に 1 個の割合で分子が存在することになります。

このように、対流圏大気の下層では分子密度が非常に高い状態にあり、しかも気体を構成する分子は高速で運動しているため、分子同士は非常に頻繁に衝突を繰り返しながらたえずエネルギーの受け渡しを行なっています（p24,25 参照）。

次に、地球の対流圏大気の分子組成を示します。

窒素 N ₂	酸素 O ₂	二酸化炭素 CO ₂	水蒸気 H ₂ O
78%	21%	0.04%	～4%

つまり、CO₂ 分子 1 個に対して、平均的にはその周辺には N₂ 分子が $78/0.04=1950$ 個、O₂ 分子が $21/0.04=525$ 個、H₂O 分子が $2/0.04=50$ 個（平均 2% とする）ほど存在することになります。

対流圏大気を構成する主要な気体分子は 2 原子分子と 3 原子分子です。その内部エネルギーは、分子が空間的な構造を持っているために、分子の重心の空間内での移動である**並進運動**のエネルギーだけではなく、分子の剛体的な**回転運動**や、分子を構成する原子の分子内における相対的な位置関係の変化である**振動運動**のエネルギーを含みます。

単原子分子の運動は、並進運動しか自由度がない。
しかし、2 原子分子以上では自由度が大きくなる。



2 原子分子（N₂ と O₂）は常温で並進 3 自由度、回転 2 自由度（結合軸周りの回転慣性 ≈ 0 であり、無視できる）の 5 自由度。常温では振動にエネルギーは分配されません。

大気を構成する分子は極めて頻繁に衝突を繰り返すことによってエネルギーを不断に再分配しており、平均的に見るとエネルギーはすべての運動モードに対して偏りなく均等に分配されています。これをエネルギーの等分配則と言ひ、これが成立していることを熱力学的平衡状態と言います。対流圏大気は常に移動しており全体を見れば熱力学的に平衡状態にあるとはいえませんが、部分を見れば近似的に熱力学平衡状態にあるということから、**局所熱力学平衡**と言われます。

高校の化学や物理で必ず習うのが気体の状態方程式です。

$$PV=nRT$$

ここに、 P は気体圧力、 V は気体体積、 n は気体のモル数、 R は気体定数、 T は気体の絶対温度です。気体の圧力や体積は、気体を構成する分子の持つ内部エネルギー、中でも並進運動のエネルギーと深く関わっています。分子の質量を m 、並進運動の平均速度を v 、分子数を N とすると、この気体の圧力は次の式で表すことができます。

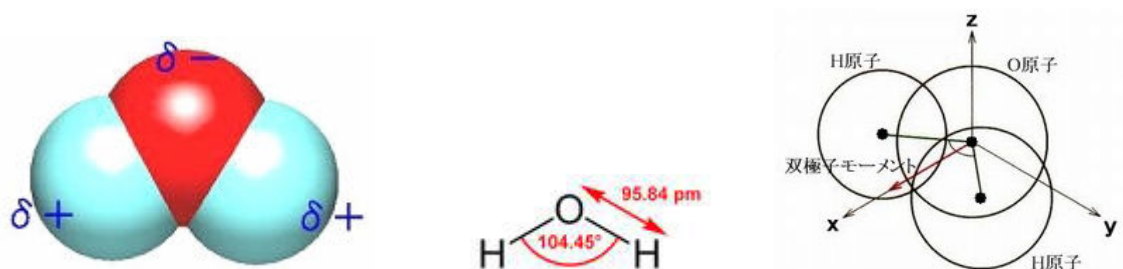
$$P = (2/3)(N/V)(mv^2/2) \quad \therefore PV = n(6.02 \times 10^{23})(2/3)(mv^2/2)$$

気体の状態方程式と上式を比べると、 $T \propto mv^2/2$ 、**気体の温度とは気体分子の並進運動に分配される平均的なエネルギー量に比例することがわかります。** こうして、気体の温度とは気体分子の運動状態を示す状態量として定義されるのです。

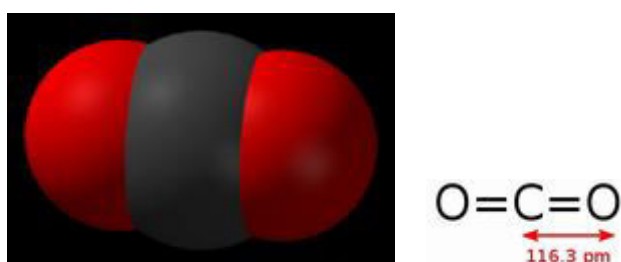
(2) 赤外活性

気体分子はその空間的な構造によって、分子内でプラスの電荷を持つ部分とマイナスの電荷を持つ部分に偏りを持つものがあります。典型的なのが水（水蒸気） H_2O 分子です。この種の分子を極性分子といいます。

H_2O は、3 原子分子で酸素原子と水素原子との結合が直線状ではないために極性分子になります。また、回転の自由度は 3（ x 軸、 y 軸、 z 軸周り）です。



これに対して、二酸化炭素分子 CO_2 は 3 原子分子ですが直線状に結合しているために無極性分子です。また、回転の自由度は 2 原子分子と同じで 2 です。



対流圏（下層大気）を構成する 3 原子以上で構成される分子の回転運動や振動運動において極性（双極子モーメント）が変化するような運動モードではその振動数に応じた赤外線放射・吸収します。振動運動で双極子モーメントが変化することによって赤外線を放射・吸収する性質のことを赤外活性と呼びます。

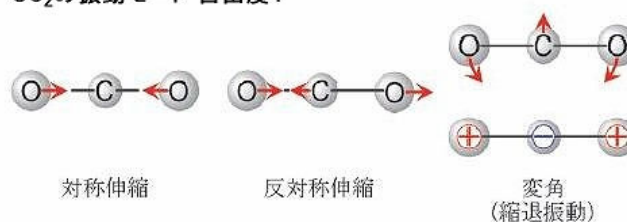
H_2O は極性分子なので、分子の剛体的な回転運動（ y 軸、 z 軸周り）とすべての振動モ

ードで双極子モーメントが変化します。

H₂Oの振動モード 自由度3



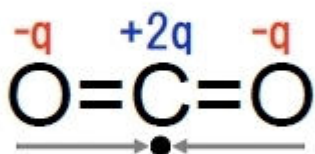
CO₂の振動モード 自由度4



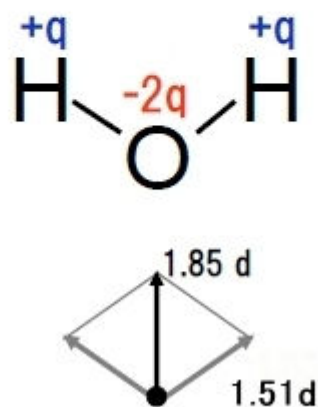
CO₂は無極性分子なので回転運動では赤外線を放射・吸収しませんが、反対称伸縮振動、変角振動で赤外活性を示します。

双極子モーメント (dipole moment)

- 双極子モーメントの大きさは、分子の対称性、極性基の位置と密接な関係を持ち、分子構造の決定に利用される



二酸化炭素は双極子モーメントを持たない。
O-H 結合の結合モーメントは1.51 dであるが
水は1.85 dの双極子モーメントを持つ。
O-H 結合の結合モーメントのベクトル和によって
水の双極子モーメントが得られていることから、
水分子が105° の結合角を有することがわかる。



(3) 対流圏下層大気はどのように加熱されるのか

地球は太陽放射を受けることで平均 15℃ほどの快適な気温に保たれています。地球の位置における太陽光に垂直な平面の受け取る太陽放射の強度を太陽定数と呼び、その大きさは 1366W/m² 程度です。地球表面がこれを均等に受け取るとした場合の放射強度は次の通りです。

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

下図に示すように、太陽放射の波長のスペクトルは可視光線を中心に短波長側は紫外線領域、長波長側は赤外線領域に広がっています。

一方、地球放射として示されているのは、平均的な太陽放射の内の 30% が反射され 70% が地球を温めるとした場合のステファン=ボルツマンの式から地球を黒体で近似した場合の放射平衡温度

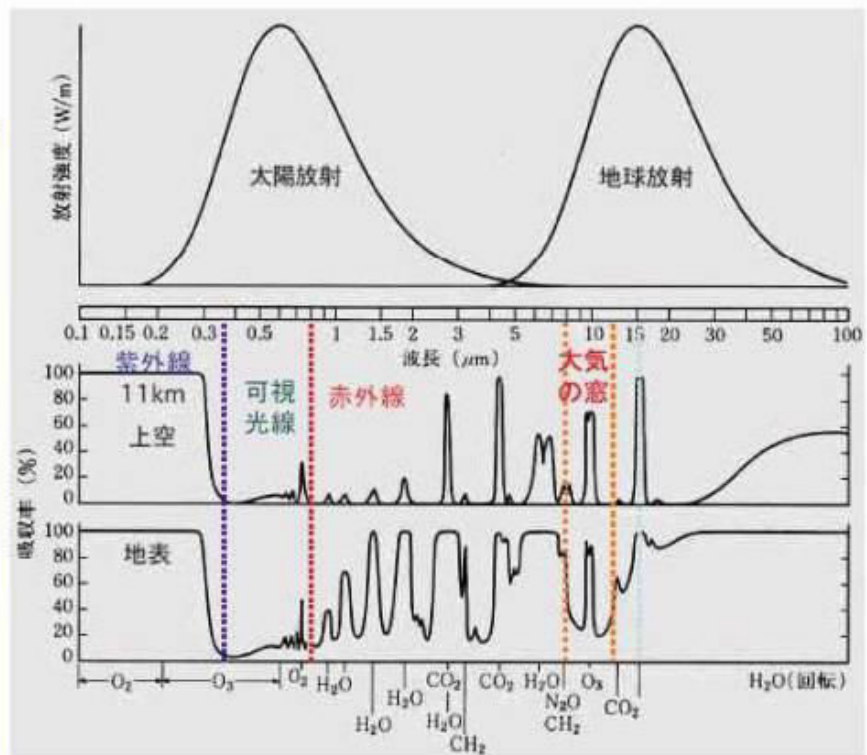
$$T = \{(341.5 \times 0.7) \div (5.67 \times 10^{-8})\}^{1/4} = 255.2 \text{ (K)} \div -18^\circ\text{C}$$

に対応する地球放射の波長スペクトルを示しています。地球放射は赤外線領域に分布しています。ただし、実際には地球から宇宙空間に放出される赤外線放射は地球のどこから放射されるかによって温度が異なるため、単一の分布で表せるわけではありませんが (3-1 参照)、あくまでも概略の平均的な値と考えて下さい。

大気 の 吸収特性

太陽放射
可視光線として
地表まで入射

地球放射
 $12 \mu\text{m} <$
 H_2O により
ほぼ 100% 吸収
 $15 \mu\text{m}$
 CO_2 による吸収
 $8\text{--}12 \mu\text{m}$
大気の窓
→ Freon-11,
 O_3 が吸収

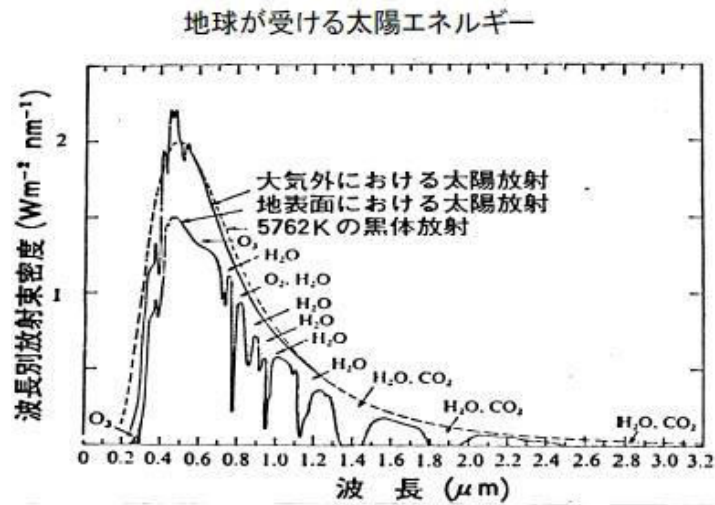


(岩波講座地球惑星科学 2, 1996)

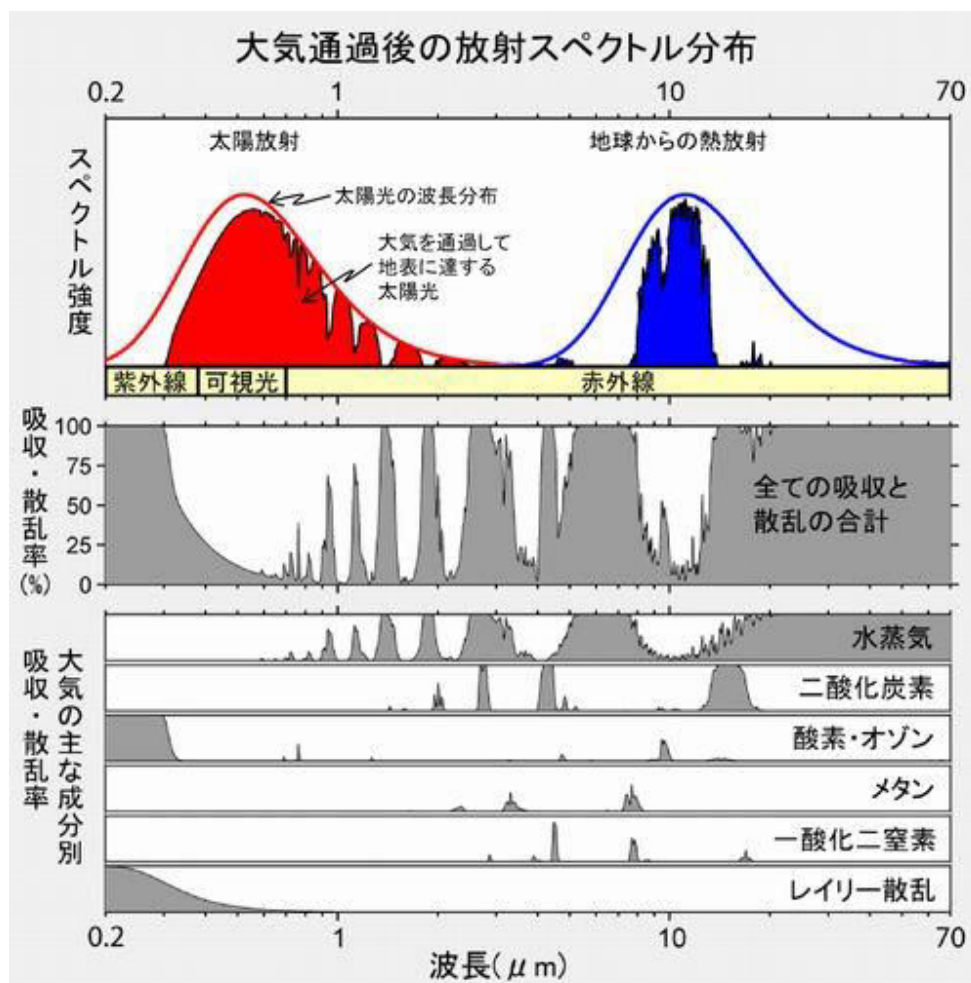
図には高度 11km 付近と地表面付近の大気の電磁波に対する吸収率も示しています。太陽放射について、地球大気は可視光線領域に対してほとんど透明なので(吸収率が小さい)、太陽放射の主要な部分である可視光線はほとんど減衰することなく地表面に到達します。

紫外線についてはオゾン層によって UV-C と UV-B の一部が吸収され成層圏大気を温め、UV-B の一部と UV-A は地表にまで到達します。赤外線の一部は大気に含まれる赤外活性を持つ気体分子が直接吸収します。

地表面に到達する太陽放射はその他に大気中の微細なチリによる反射（レイリー散乱）の影響も受けて減衰します。



こうして地表に到達した太陽放射によって暖められた地表面が、平均的に $15^{\circ}\text{C}=288\text{K}$ で赤外線を大気に放射します。これを地表面放射と呼ぶことにします。



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

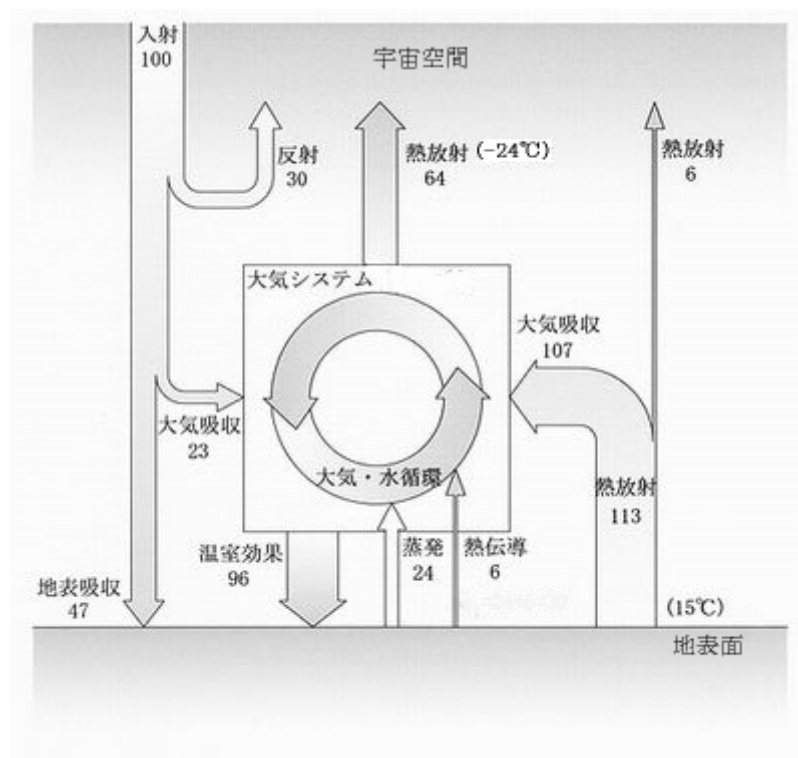
前頁の図に示すように、 H_2O 分子は、大気の窓以外のほとんどすべての波長の地表面放射を吸収していることが分かります。また、地表面放射に対する CO_2 による吸収はごく限られていることが分かります。

図では、大気の窓領域からかなり大量の地表面放射が宇宙空間に直接放射されているように見えますが、ここで示しているのは透明な大気についての吸収特性であることに注意して下さい。地球は平均的に表面積の 60% 程度が雲に覆われています。雲があると地表面放射は 100% 吸収されます。更に、雲がなくても湿度の高い大気中では水蒸気クラスター (H_2O 分子の水素結合) によって大気の透明度が落ちるため事実上大気の窓はふさがっています。

しかし、乾燥した大気を持つ砂漠や、寒冷地では大気中の水蒸気濃度が極端に低くなることによって地表面放射が大気の窓などから直接宇宙空間に放出されます。これを放射冷却現象と呼びます。

地表面放射を受け取った赤外活性気体分子は対流圏大気下層のように大気を構成する分子密度が高い環境では周辺の分子と頻繁に衝突を繰り返し、そのたびにエネルギーは再配分されます。衝突する対象となる分子としては、 N_2 分子と O_2 分子が圧倒的に多く、励起された赤外活性気体のエネルギーの大部分は分子衝突によって N_2 分子と O_2 分子の運動エネルギーとして配分されることになります。

既に述べたように、対流圏下層のように比較的分子密度が高い環境では局所熱力学平衡の条件が成立しており、大気に供給されたすべてのエネルギーは平均的に見ると、大気を構成する分子の持つすべての運動モードに対して等分配されることになります。その結果、大気の持つエネルギー量に対して、分子の並進運動に関する気体の温度が一意的に決まるのです。



前頁の図に、地球の受け取る平均太陽放射 341.5W/m^2 を 100 とした場合のエネルギーフローの概略を示します。大気システムは、太陽放射の赤外線部分から 23、地表面放射から 107、地表面からの熱伝導で 6、水の蒸発潜熱で 24 のエネルギーを受け取り、これらすべてが大気を構成する分子のすべての運動モードに対して等分配されることによって大気の温度状態が決まるのです。

大気の温度状態＝エネルギー状態が決まると、局所熱力学平衡の条件からその温度状態に対応する一定割合の赤外活性気体分子が励起された状態にあるため、定常的な赤外線放射が生じます。この大気からの定常的な赤外線放射は、大気の温度によって決まるのであって、地表面放射を受け取った赤外活性気体分子が再放射するわけではありません。なぜなら、赤外線を吸収して励起された赤外活性気体分子が再放射するまでの平均時間 (ms : 1/1,000 秒のオーダー) に対して分子衝突の起こる時間 (ps : 1/1,000,000,000,000 秒のオーダー) のほうが圧倒的に短いために、再放射以前にエネルギーの受け渡しがおこるので、再放射が起こる可能性はほとんどないのです。

赤外線は励起状態にある赤外活性気体分子からあらゆる方向に放射され、大気中を進むうちに周囲の赤外活性気体分子に吸収されて透過距離に対して指数関数的に減衰します。比較的下層の大気からの赤外線放射の内**地表面に到達する大気放射**を“大気の温室効果”と呼んでいると考えられます。

補足 1) 気体分子速度に関するマクスウェル分布

熱力学的に平衡状態にある気体では、エネルギー等分配側によって気体分子の各自由度に対してエネルギーが均等に分配されています。

たとえば、熱力学的に平衡状態にある気体の並進運動の速さは、平均速さの周りに幅を持って分布しています。速さ v の分子の存在確率の分布を表す曲線は、 m を分子の質量、 k をボルツマン定数、 T を温度として次の式で表されます。

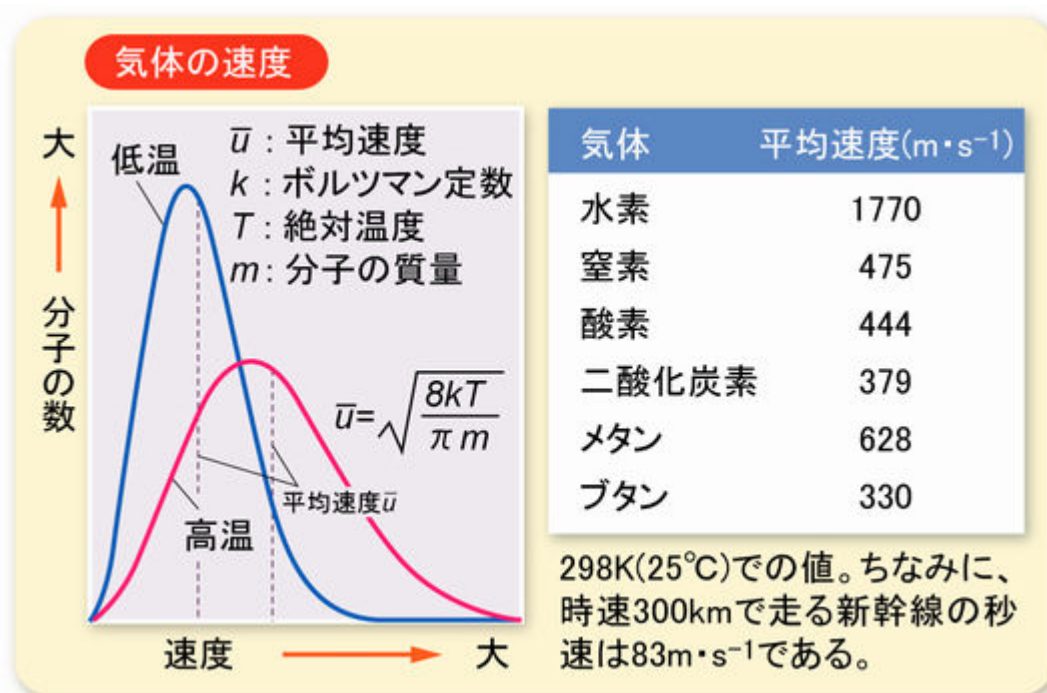
$$f(v) = 4\pi v^2 \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} \exp \left(\frac{-mv^2}{2kT} \right)$$

これを Maxwell 分布と呼びます。分布曲線の形状は、質量 m が小さく気温 T が高いほど平均速さが大きく、裾野の広い分布になります。

分子の並進運動が Maxwell 分布に従う場合、1 気圧の大気を構成する分子が、他の分子に衝突せずに直進できる平均の距離＝平均自由行程は 68nm 程度です。

次頁の表に、対流圏大気を構成する主要な気体分子の 25°C における平均の速さを示します。分子の平均の速さを 450m/s だとした場合、平均自由行程を進むのにかかる時間＝分子同士の平均衝突時間間隔は、次のとおりです。

$$68 \times 10^{-9} \text{m} \div 450 \text{m/s} = 151 \times 10^{-12} \text{s} = 151 \text{ps}$$



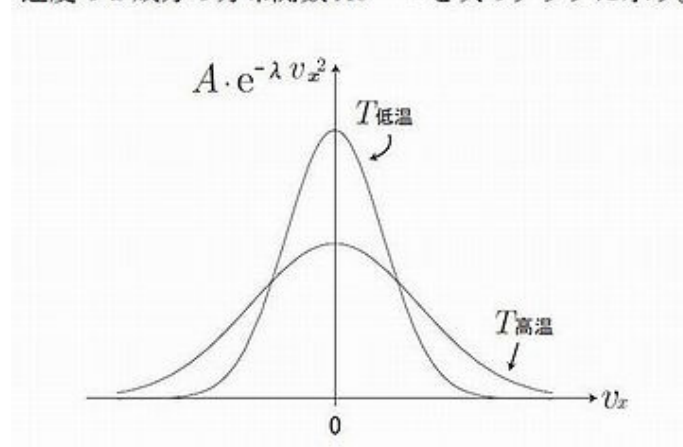
気体分子の速さの分布が Maxwell 分布に従うのは、分子が極めて頻繁に衝突を繰り返しているからです。逆に、気体を構成する分子の速さが Maxwell 分布に従うような状態であれば、気体分子密度が大きく熱力学的な平衡状態にあるといえます。

上図は気体の速度と表記していますが、実際には速度ベクトルの大きさ (= 速さ)

$$|\vec{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$$

を示したものです。速さと方向を考慮した速度の平均値は 0 であり、例えば速度ベクトルの x 方向成分の分布は次図に示す正規分布になります。

速度の x 成分の分布関数 $Ae^{-\lambda v_x^2}$ を次のグラフに示す。



補足 2) 気体分子の吸収スペクトル

分子の内部構造に関わる運動は、古典的なニュートン力学の運動とは異なり、ある最小単位の値の整数倍の不連続な値を取る。この最小単位を量子と呼ぶ。その不連続な状態に対応する離散的なエネルギーをエネルギー準位と呼ぶ。運動が異なるエネルギー準位に移ることを遷移という。

分子内部のエネルギー状態には、回転、振動、それに電子軌道の状態がある。各運動のエネルギー準位間の遷移に必要なエネルギー量子の大きさには『回転<振動<電子』の関係がある。

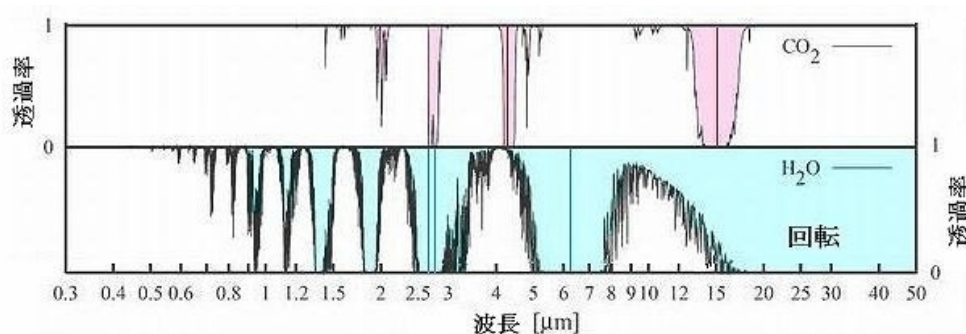
一方、電磁波の持つエネルギーも光量子で表される離散的な値を取る。

$$E = h\nu$$

ここに、 $h = 6.626 \times 10^{-34} (J/s)$: プランク定数,

ν (m^{-1}) : 波数, $1/\nu = \lambda$ (m) : 波長

つまり、波数が大きいほど（波長が短いほど）光量子の値は大きくなる。



回転スペクトル

回転準位間の遷移エネルギーは最も小さいく、長波長側の電磁波を吸収する。極性分子である H_2O 分子の回転運動では、長波長側の赤外線を吸収する。隣接するエネルギー準位の間隔が狭いために回転スペクトルは相互に干渉して包絡した連続スペクトルになる。

振動スペクトル

振動分子が双極子モーメントを生じる場合、電磁波と分子の間にエネルギーの移動が生じる。この性質を赤外活性と呼ぶ。 H_2O 分子では基準振動に対して $6.27 \mu m$ (変角振動)、 $2.73 \mu m$ (対称振動)、 $2.66 \mu m$ (反対称振動) を中心とした赤外線を吸収する。 CO_2 分子では基準振動に対して $15.01 \mu m$ (変角振動)、 $4.26 \mu m$ (反対称振動) を中心とした赤外線を吸収する。吸収スペクトルは、励起状態の寿命の不確定性、ドップラー効果、分子衝突による干渉などの影響で線スペクトルとはならず、分布幅は圧力や温度等に依存する。

電子スペクトル

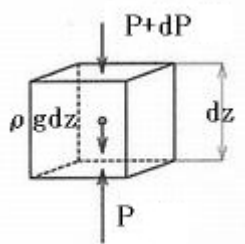
分子の電子軌道配列が遷移する場合には大きなエネルギーが必要となる。電子スペクトルはエネルギーの高い紫外線領域にある。

2-2 対流圏の温度分布はどのように決まるか

(1) 乾燥大気の断熱温度減率

地表付近で暖められた大気は上昇気流となり対流圏大気上層にエネルギーを輸送することになります。これは、暖められた大気は密度が小さいために軽く、上昇傾向を持つためです。対流圏大気の温度分布は大気の重力に対する安定性を満足するように決まるのです。まず、乾燥大気について考えることにします。

① 重力場における空気の釣り合い



上図に示す重力場における大気の微小立方体に作用する鉛直方向の力の釣り合いから、

$$P + dP = P - A\rho g dz$$
$$\therefore dP = -A\rho g dz \quad \text{ここに、}\rho: \text{気体密度、}g: \text{重力加速度}$$

ここで、微小立方体に作用する外力を単位面積あたりの圧力 p に変換するために微小立方体の底面積 A で両辺を割ると、

$$\therefore dP/A = dp = -\rho g dz \quad (1)$$

②断熱過程

気体に加えられた熱量 (dq) は、その過程で気体がした仕事量 (dw) と内部エネルギーの変化量 (du) の和と等しい。

$$dq = dw + du$$

ここでは断熱過程を取り扱うので、 $dq=0$ である。圧力 p に抗して外部に対してした仕事量は、体積変化を dV とすると、 $dw = pdV$ である。定積モル比熱を C_v とすると、温度変化 dT による内部エネルギーの変化量は、 $du = C_v dT$ である。以上より、

$$0 = pdV + C_v dT \quad \therefore pdV = -C_v dT \quad (2)$$

③気体の状態方程式の微分

1mol の気体に対する気体の状態方程式は次式で表される。

$$pV = RT$$

状態方程式の微分を求めると、

$$dpV + p dV = R dT = (C_p - C_v) dT$$

($\because$ 定積モル比熱 C_v と定圧モル比熱 C_p には $C_p = C_v + R$ の関係がある。)

断熱過程なので、式(2)より $p dV = -C_v dT$ なので、

$$dpV = C_p dT \quad \therefore dp = (1/V) C_p dT \quad (3)$$

④等温位直線

式(1)と式(3)より、

$$(1/V) C_p dT = -\rho g dz \quad \therefore dT = -(pVg/C_p) dz = -(mg/C_p) dz$$

ただし、 m は気体 1mol の質量 (4)

式(4)の左辺を 1 気圧における大気温度 T_1 から、1 気圧を基準とした高度 H における大気の温度 T まで積分し、右辺を 0 から H まで積分する。

$$T - T_1 = -(mg/C_p)H$$
$$\therefore T = T_1 - (mg/C_p)H \quad (5)$$

乾燥大気を断熱的に 1 気圧にした時の温度 T_1 のことを温位と言います。式(5)で表される直線上の乾燥大気は同じ温位を持つので、この直線を等温位直線と呼びます。定圧比熱として単位質量あたりの値を利用する場合には、等温位直線は次のようになります。

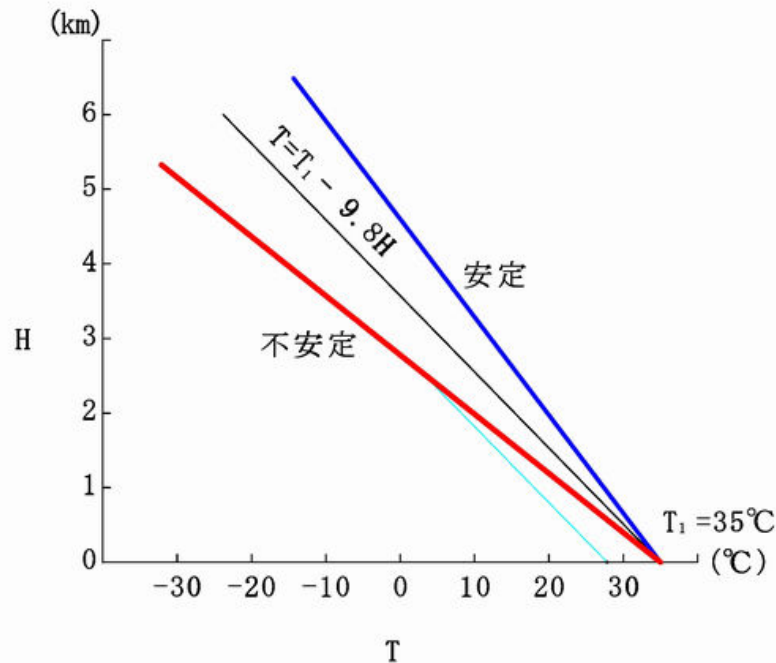
$$T = T_1 - (g/C_p)H \quad (6)$$

※厳密には、重力加速度 g は z (高度) の関数になるが、大気厚は惑星半径に比べて十分小さいとして一定値で近似している。

式(5),(6)で表される直線の傾き $-(g/C_p)$ を乾燥大気の断熱温度減率と呼びます。地球大気では次の通りです。

$$-(g/C_p) = -(9.8\text{m/s}^2)/(1004\text{m}^2/\text{s}^2 \cdot ^\circ\text{C}) = -0.0098^\circ\text{C}/\text{m} = -9.8^\circ\text{C}/\text{km}$$

例えば、地表の大気温度を 35°C とした場合の乾燥大気の等温位直線を次の図に示します。



等温位直線上では温位が等しい、つまりこの線上で表される大気は同じ重さを持ちます。

等温位直線よりも大きな温度勾配を持つ例えば赤い直線で表される温度分布を持つ大気は、上層ほど温位が低く重い大気となる不安定な大気構造になるので、上層の大気と下層の大気が入れ替わる対流が起こり、大気が安定する温度分布を回復しようとしします。逆に等温位直線よりも小さな温度勾配を持つ例えば青い直線で表される温度分布を持つ大気は、上層ほど温位が高く軽い大気なので大気構造は密度成層となり安定です。

地球大気は一般的に地表面で加熱されるため下層ほど高温になるのが普通の状態です。この場合、等温位直線で表される温度分布を回復するために対流圏ではある程度の対流運動が起こっているのが常態です。地表で暖められた大気が上昇できる限界の高度が対流圏界面です。成層圏では温度勾配が正となり、大気は安定密度成層になります。

天気予報で「上空に寒気が入るので大気が不安定になる」という場合は、対流圏上層大気が著しく重くなるために激しい対流が起こり積乱雲を発達させやすくなります。

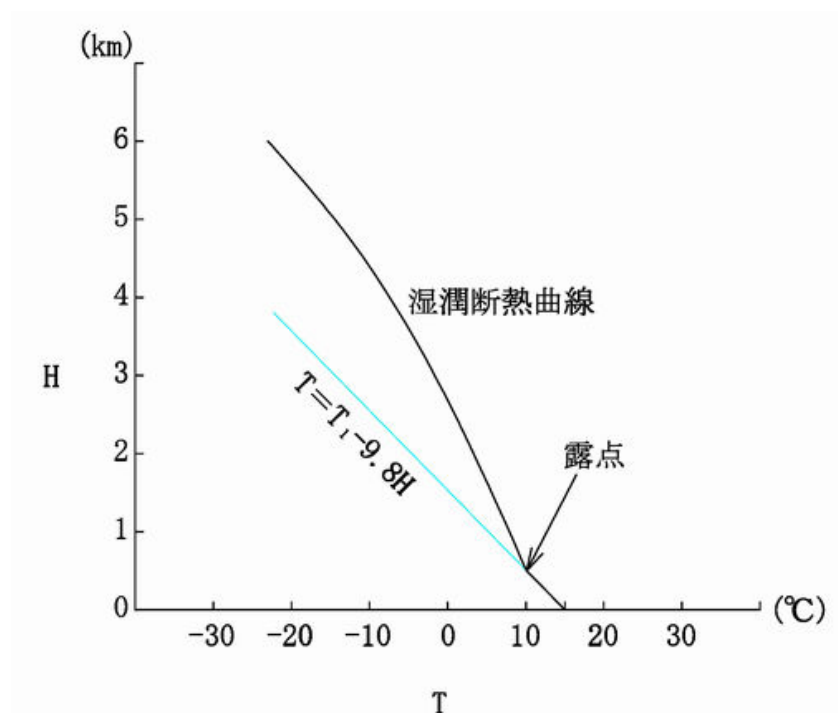
放射冷却現象が起こる場合には逆に地表面が冷却されるために下層ほど低温となり大気が安定することになります。このような大気の状態を**逆転層**と呼びます。秋から冬にかけて穏やかな晴天日には盆地では地表面で冷やされた水蒸気が凝結して底霧あるいは盆地霧と呼ばれる現象が見られます。

(2) 湿潤断熱減率

前節で、大気の安定構造について説明しました。ただし実際には対流圏の大気は乾燥しておらず、水蒸気を含んでいます。ここでは水蒸気で飽和している大気の安定性について

考えてみることにします。

水蒸気で飽和している大気を断熱的に減圧すると、温度の低下にともなって水蒸気が凝結することになります。水蒸気が凝縮して水（滴）になる時には凝縮熱を放出します。その大きさは $2,463\text{J/g}$ (15°C) 程度です。その結果、湿潤大気は凝縮熱で暖められるために乾燥大気に比べて断熱減圧による温度低下が小さくなります。



飽和水蒸気量は気温によって大きく変化するため、湿潤断熱減率は条件によって大きく変化しますが、通常 -5°C/km 程度としています。

湿った大気は、温度が露点に達する高度よりも低い間は乾燥断熱減率に従って温度が変化します。温度が露点に達すると水蒸気の凝結が始まり、湿潤断熱曲線にしたがって温度が変化することになります。

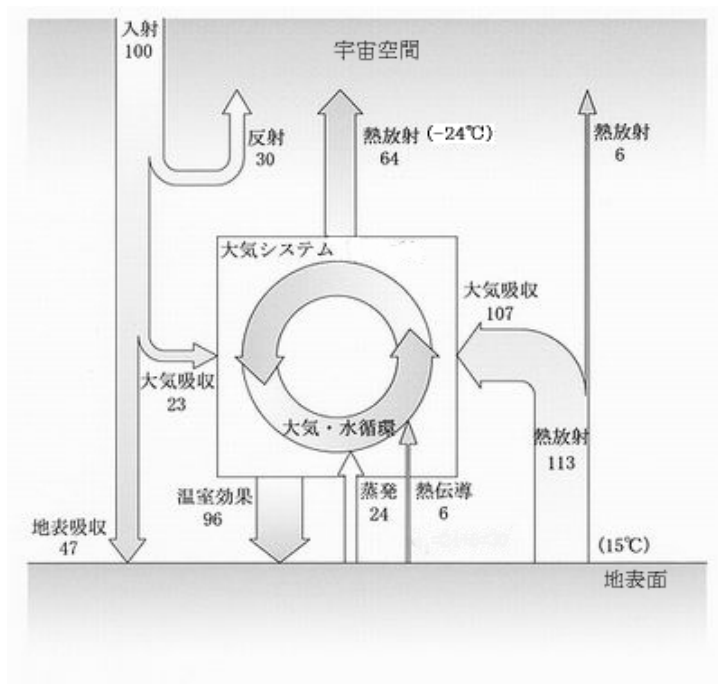
図からわかるように、露点に達した大気は、乾燥断熱減率よりも温度減率が小さくても不安定になることがわかります。

(3) 対流圏大気の鉛直温度分布と地球放射

地球大気は砂漠のような乾燥した大気から熱帯雨林のような湿度の高い大気まで大きな幅があります。実際の地球大気の対流圏における平均的な温度の鉛直構造は、対流圏上端、高度 11km で -56.4°C 、地表温度は 15.2°C といわれています。温度減率は $(-56.4 - 15.2) \div 11 \div -6.5^\circ\text{C/km}$ 程度ということになります。

これまで見てきた地球の対流圏における鉛直温度分布から、地球の赤外線放射による放熱についてもう一度考えて見ることにします。地球のエネルギーフローの概略をもう一度

示しておきます。



地球の温度環境がほとんど定常的であるための条件は、「有効太陽放射 $\div$ 地球放射（＝地表面放射＋大気放射）」であることです。地球の受け取る有効太陽放射は、

$$341.5\text{W/m}^2 \times 70\% = 239.05\text{W/m}^2$$

15°C （ 288K ）に暖められた地球の表面放射はステファン=ボルツマンの式から次のように求められます。

$$(5.67 \times 10^{-8}) \times 288^4 = 390.08\text{W/m}^2$$

図を参考にすると、地球の表面放射の内の $6/113$ が地球大気に捉えられずに、主に大気の窓領域を通してそのまま宇宙空間に放出されます。

$$390.08\text{W/m}^2 \times 6/113 = 20.71\text{W/m}^2$$

その結果、対流圏大気上層における大気あるいは雲頂からの低温赤外線放射で放熱されているのは次の通りです。

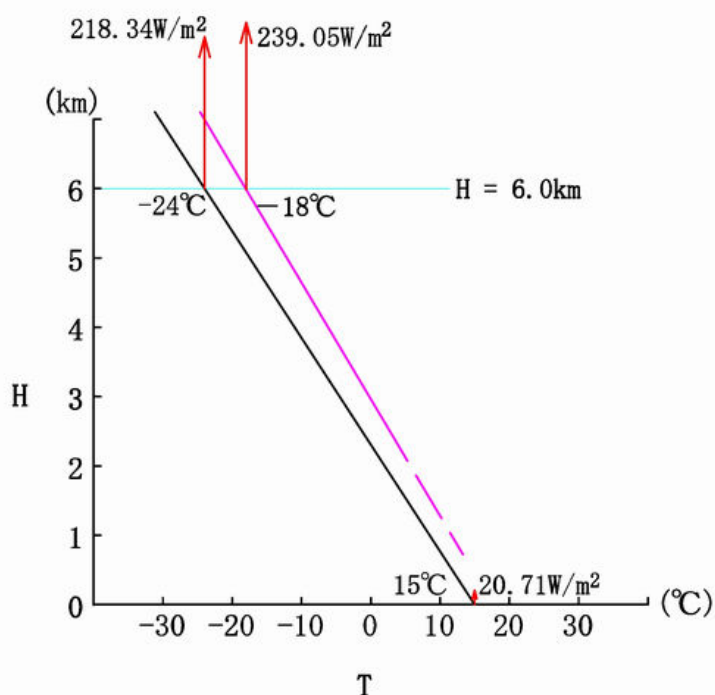
$$239.05\text{W/m}^2 - 20.71\text{W/m}^2 = 218.34\text{W/m}^2$$

これに対する放射平衡温度は、次の通りです。

$$T = \{218.34 \div (5.67 \times 10^{-8})\}^{1/4} = 249.1(\text{K}) \div -24^\circ\text{C}$$

大気の温度が放射平衡温度になる高度 H は、地表面温度を 15°C とすると、

$$H = (-24 - 15) \div (-6.5) = 6.0\text{km}$$



以上をまとめると、太陽から受け取る有効太陽放射 239.05W/m^2 と、放射冷却現象による地表面からの赤外線放射 20.71W/m^2 と高度 6.0km 付近を中心とする -24°C の大気からの低温赤外線放射 218.34W/m^2 の合計が釣り合っていることによって地表面温度 15°C の温度環境の定常性が成立しているのです。

さて、これで冒頭に示した現代社会の教科書に記載されている温暖化の説明図の誤りを指摘する準備ができました。図では、地球大気の温室効果が増大することで、大気から地表面に向かう赤外線放射が大きくなる一方、大気上層からの低温赤外線放射が小さくなる事を示しています。

安定した定常的な温度環境が維持されているならば有効太陽放射と地球放射が釣り合わなければなりません。**有効太陽放射と地球放射が不平衡になれば温度は非定常な熱暴走状態に陥り、地球は急激に加熱（あるいは冷却）されてしまうこととなります。**

もう少し具体的に考えることにします。仮に、地球大気の温室効果が大きくなり、放射冷却現象によって地表面から直接宇宙空間に放出されている赤外線をすべて大気が吸収することによって気温が上昇したとします。この場合、有効太陽放射と対流圏大気上層からの低温赤外線放射が釣り合うように地表面温度が定まるのです。そのときの放射平衡温度は -18°C です。大気上層からの低温赤外線放射の平均的な高度が 6.0km だとすれば、その平均温度が -24°C から -18°C に 6°C 上昇することになります。

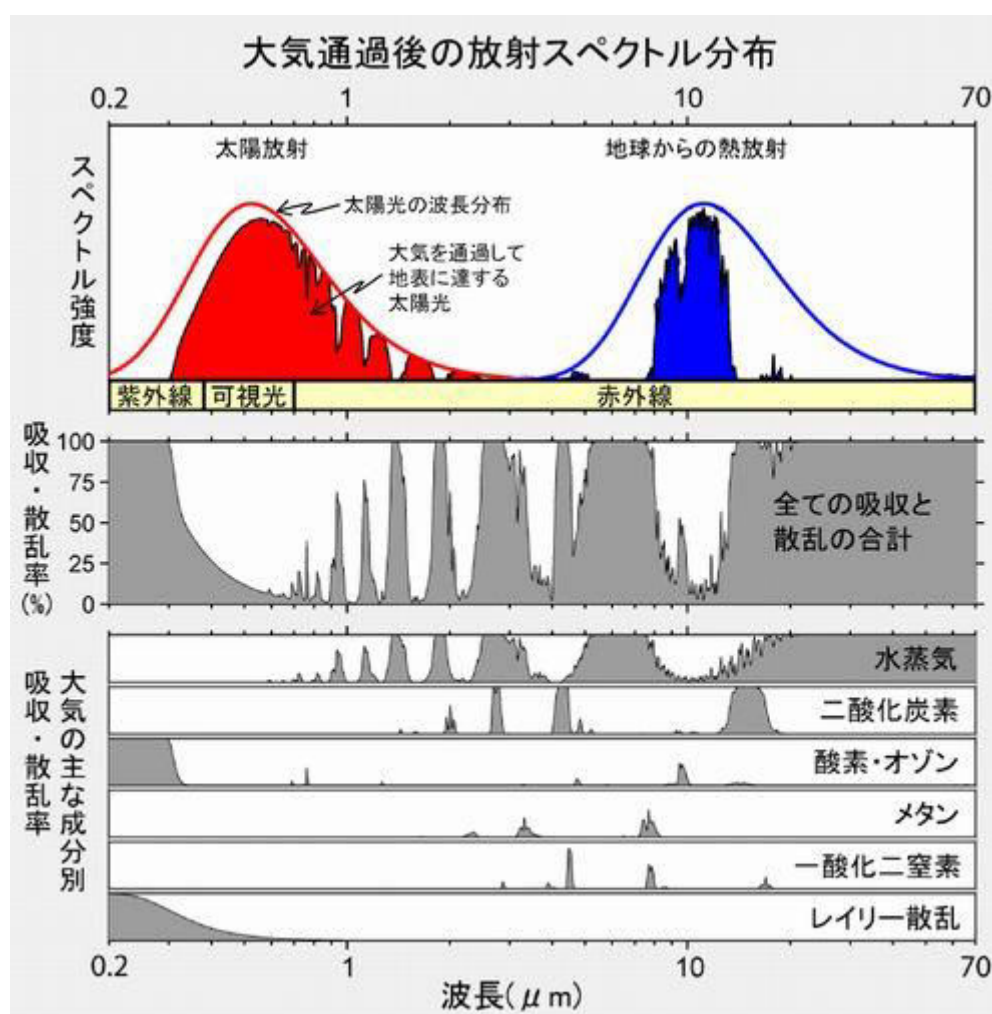
つまり、**温室効果の増大によって気温が上昇するのならば、大気上層からの赤外線放射は大きくなるのです。**

2-3 CO₂ 濃度の上昇の及ぼす影響

(1) CO₂ 濃度の上昇で放射冷却は防げない

現在の気組成では、地表面放射の 6/113 が大気に捕捉されことなく宇宙空間に直接放射されています。この放射冷却現象は、対流圏大気の主要な赤外活性気体である水蒸気濃度が減少することによって、水蒸気の吸収帯域に対応する地表面放射が主に大気の窓領域（8～12 μm 付近の帯域）を通して直接宇宙空間に放射されることによって生じます。

次図に示すように、平均的な大気では水蒸気による赤外線の吸収率は 8～12 μm 付近の帯域で小さくなっている以外は地表面放射をほぼ 100% 吸収します。また、水蒸気濃度が高ければ雲がなくても水蒸気クラスターによって事実上大気の窓も閉じています。



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

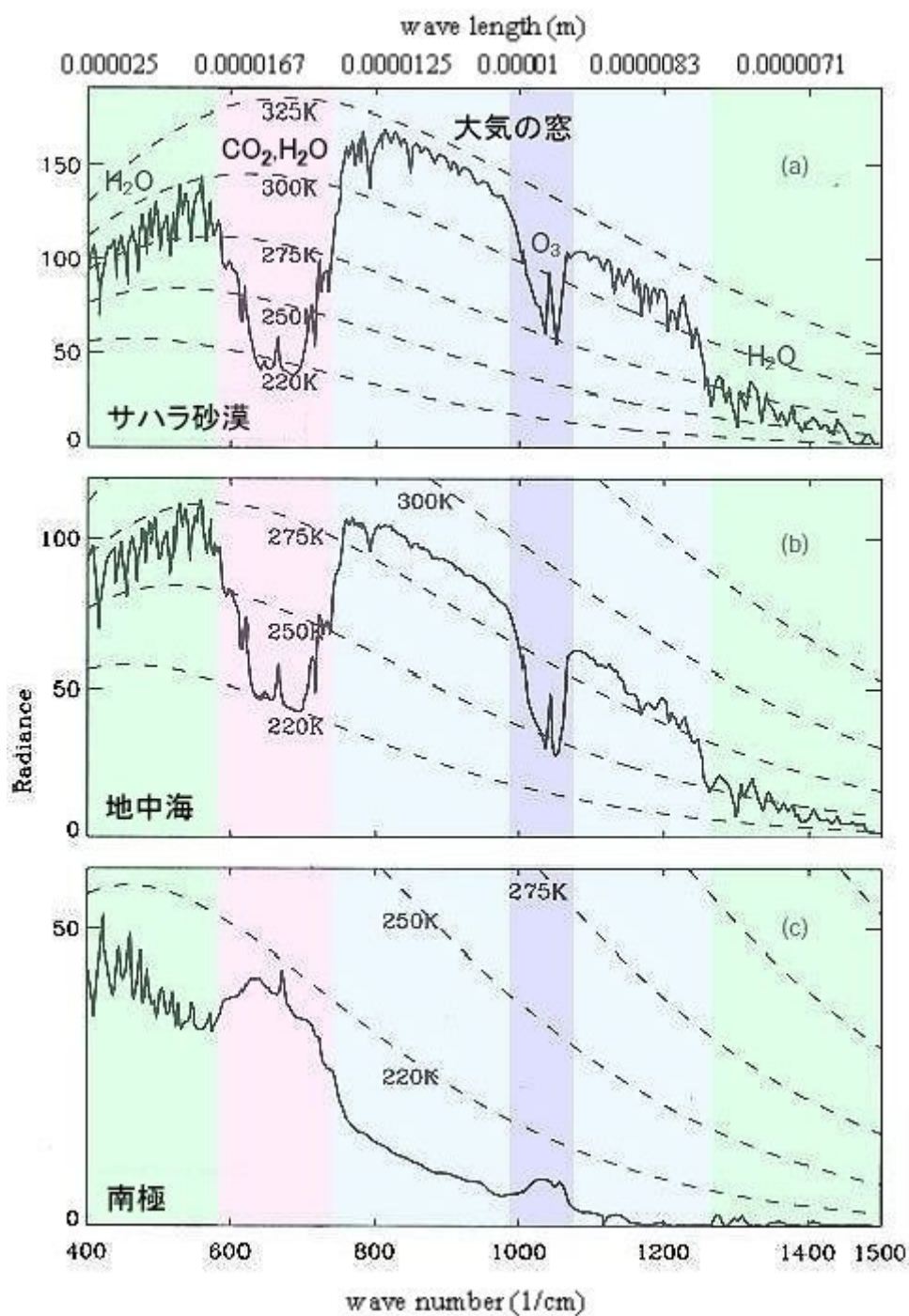
これに対して、地表面放射の分布と重なる CO₂ の吸収帯域は 4 μm を少し超えた付近と 15 μm 付近に限られます。4 μm と 15 μm 付近における吸収率は既にほぼ 100% です。

一口に温室効果ガスといっても、それぞれの気体分子には吸収できる波長帯域が決まっています。CO₂ は既に地表面放射を吸収するために十分な濃度を有しており、これ以上い

くら大気中の濃度が上昇したとしても、地表面放射を吸収するという局面において何ら効果はないのです。いくら CO_2 濃度が上昇したとしても $4\mu\text{m}$ と $15\mu\text{m}$ 以外の波長帯域の赤外線を吸収することはできないのです。

以上から、大気中の二酸化炭素濃度がいくら上昇したとしても、放射冷却現象を小さくすることは出来ないのです。

ここで、実際の地球放射の分布を米国の観測衛星ニンバスの観測結果から紹介しておきます。



図には、主要な赤外活性気体分子の吸収帯域と大気の窓を示しています。この3箇所の

観測地は水蒸気濃度が低く大気の透明度の高い地域です。そのため、“大気の窓”領域（水色の部分）では地表面放射がそのまま観測されていると考えることができます。大気の窓領域の放射強度分布から、サハラ砂漠の表面温度は約 $320\text{K}=47^{\circ}\text{C}$ 、地中海の表面温度は約 $285\text{K}=12^{\circ}\text{C}$ 、南極の表面温度は約 $210\text{K}=-63^{\circ}\text{C}$ 程度だと考えられます。

$15\mu\text{m}$ 付近（桃色の部分）は大気中に含まれる CO_2 による赤外線放射・吸収特性を示していると考えられます。ニンバスが捉えている $15\mu\text{m}$ 付近の地球放射は地表面放射ではなく対流圏大気上層の大気温度が $220\text{K}(-53^{\circ}\text{C})$ 付近における CO_2 による放射だと考えられます。地表面温度を $15^{\circ}\text{C}=288\text{K}$ だとすると高度は、

$$H=(220-288)\div(-6.5)=10.5\text{km}$$

対流圏界面付近ということになります。

面白いのは南極の分布です。南極では大気の窓における放射強度よりも CO_2 や O_3 （薄紫色の部分）の吸収帯の放射強度の分布のほうが高温を示しています。これは南極の表面温度よりも対流圏上層大気のほうが高温であることを示しています。

（2） CO_2 濃度の上昇による影響

前節の検討から、たとえ CO_2 濃度が上昇したとしても、対流圏大気の地表面放射に対する吸収量に変化が起きないことがわかりました。つまり、対流圏大気が保持するエネルギー量に変化は起きないのです。

局所熱力学平衡にある対流圏大気では大気を構成する分子のすべての運動モードに対してエネルギーが等分配されるので、 CO_2 濃度が上昇すると CO_2 分子の運動に対して分配される割合がほんの少しだけ増えることになります。しかし、これは同時に CO_2 以外の分子の運動に分配されるエネルギーの割合が減少することを意味します。

CO_2 分子に配分されるエネルギー量が増えることによって、確かに CO_2 分子からの赤外線放射量が増えますが、同時に H_2O 分子に配分されるエネルギー量が減ることによって、 H_2O 分子からの赤外線放射量は減少することになります。また、大気を構成する全分子の並進運動に配分されるエネルギー量も減少することになり、むしろ大気温度は低下し、ステファン=ボルツマンの式に従うならば、大気からの合計の赤外線放射量も減少することになるでしょう。

いずれにしても、 CO_2 分子の増加によって大気の地表面放射に対する吸収量が劇的に変化するのではなく、 CO_2 分子のわずか 100ppm ($=100\times 10^{-6}=0.01\%$) オーダーの増加が大気の温度状態を劇的に変化させることはありえないのです。

(3) 国立環境研究所の温暖化説

かつて国立環境研究所のホームページに江守正多氏のとても専門家とは思えない解説が公開されていました。現在はさすがに消去されているようですが、彼の解説はいまだにひとり歩きしているようなので、簡単に触れておきます。まず原文を引用します。

仮に、地表から放出された赤外線のうち、二酸化炭素によって吸収される波長のものがすべて一度吸収されてしまおうが、二酸化炭素が増えれば、温室効果はいくらでも増えるのです。なぜなら、ひとたび赤外線が分子に吸収されても、その分子からふたたび赤外線が放出されるからです。そして、二酸化炭素分子が多いほど、この吸収、放出がくりかえされる回数が増えると考えられます。

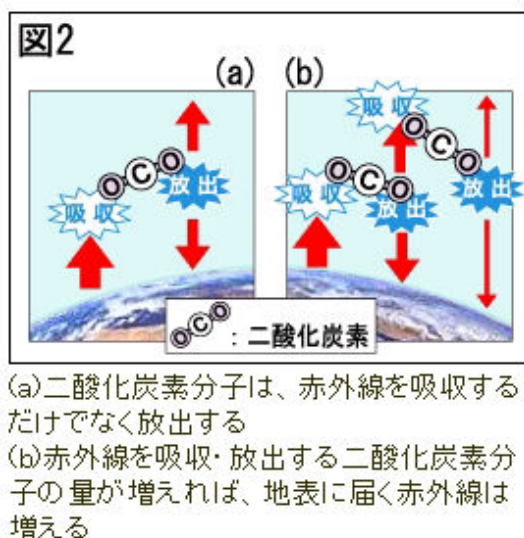


図2は、このことを模式的に表したものです。二酸化炭素分子による吸収・放出の回数が増えるたびに、上向きだけでなく下向きに赤外線が放出され、地表に到達する赤外線の量が増えるのがわかります。

その極端な例が金星です。もしも金星の大気に温室効果がなかったら、金星の表面温度はおよそ -50°C になるはずですが、二酸化炭素を主成分とする分厚い大気の猛烈な温室効果によって、実際の金星の表面温度はおよそ 460°C になっています。これは、地球もこれから二酸化炭素がどんどん増えれば、温室効果がいくらでも増えることができる「証拠」といえます。

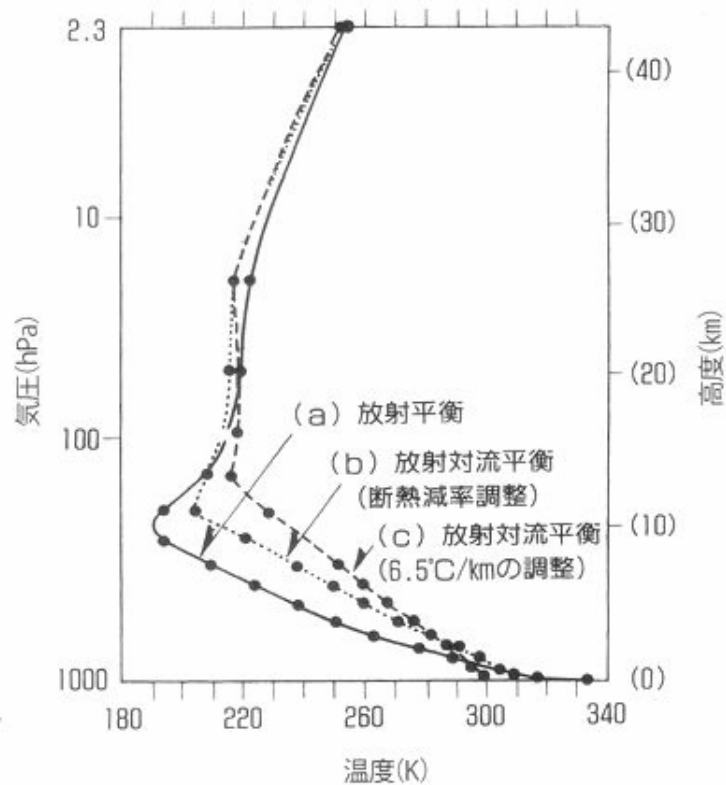
江守氏の解説はこれまでの説明で既に答えを示していますが、再度確認しておきます。

まず、『ひとたび赤外線が分子に吸収されても、その分子からふたたび赤外線が放出されるからです。』という主張です。この「ふたたび」という言葉が CO_2 分子による赤外線の再放射として広がってしまいましたが、2-1で述べた通り、地表面放射を吸収した CO_2 分

子が再び赤外線を放射する可能性はほとんどないのです。あくまでも大気の状態によって定まる一定割合の赤外活性気体から定常的な赤外線放射が起こっているのです。

次に、『そして、二酸化炭素分子が多いほど、この吸収、放出がくりかえされる回数が増え则认为することが出来ます。』と述べていますが、仮に CO_2 分子間で放射吸収が繰り返し起こるとしても、当然ですがエネルギー保存則から地表に到達する赤外線放射が増加することはありません。局所熱力学平衡の成り立つ大気中の赤外活性気体はその温度状態に応じた定常的な赤外線放射を行うと同時に赤外線を吸収しています。その意味で放射吸収は無限に繰り返されていますが、放射吸収の回数という通時的な量は無意味であり、熱平衡状態におけるエネルギー分布の状態が問題なのです。

江守氏は、大気地表面放射に対する吸収量に変化しなくても、温室効果ガスが増加すれば、対流圏低層大気温度が上昇することを主張しているわけです。しかしこれは、大気の重力的な安定性を無視した『移動しない大気』にしか成り立たない話です。実際の地球の対流圏大気では、2-2 で述べた通り、大気の重力に対する安定性から、平均 $6.5^\circ\text{C}/\text{km}$ を超えるような温度勾配は存在し得ないのです。



図表 A - 6 中緯度地帯の代表的条件に対応する放射平衡および放射対流平衡にある大気温度の高度分布
(Manabe, S., J. Atmos. Sci. 21 [1964] P. 370)

江守氏は、上図(a)に示す気温のコンピューターシミュレーションの創始者である真鍋による移動しない多層大気に対する放射平衡モデルの計算結果が対流圏温度勾配 $17^\circ\text{C}/\text{km}$ 、地表面温度 60°C といふとんでもない値を与えた誤りから何も学んでいないようです。

また、『もしも金星の大気に温室効果がなかったら、金星の表面温度はおよそ -50°C になるはずですが、二酸化炭素を主成分とする分厚い大気の猛烈な温室効果によって、実際の金星の表面温度はおよそ 460°C になっています。』については、“温室効果がなかったら”ではなく“分厚い大気がなかったら”の誤りです。この -50°C というのは単に金星における有効太陽放射に対する放射平衡温度を計算した値にすぎません。

金星の表面温度が高いのは、金星表面の大気圧が 90 気圧を超える高圧であることが主要な原因です。これは気体の状態方程式からも容易に推定できることです。金星表面の大気圧が地球程度の 1 気圧であれば、大気組成にかかわらず気温はほとんど変わらないのです。以下、簡単な試算をしてみます。

1mol の理想気体についての状態方程式は次の式で表されます。

$$pV = RT \quad \text{①}$$

圧力 p の下で 1mol の気体に、外部から微小な熱量 dQ を与えたとき、体積が dV だけ変化したとします。この時、1mol の気体の受け取った熱量 dQ は、圧力 p が気体の体積変化 dV に対してした仕事と内部エネルギー（気体分子の運動エネルギー） U の変化 dU の和に等しくなります。

$$dQ = dU + pdV \quad \text{②}$$

今、 dQ を与えることによって、気体の体積は変化しないものとします。この場合、②式において $dV = 0$ と置くことが出来ます。気体の体積が変化しない場合に dQ を与えられた気体の温度上昇を dT とすると、気体の定容比熱を C_v と置くと次の式が得られます。

$$dQ = C_v \cdot dT \quad \therefore C_v = \frac{dQ}{dT} = \frac{dU}{dT} \quad \text{③}$$

次に、 dQ を与えられた気体の圧力 p が一定の場合について考えます。このとき $dV \neq 0$ になります。圧力 p が一定の場合に dQ を与えられた気体の温度上昇を dT とすると、気体の定圧比熱を C_p と置くと次の式が得られます。

$$dQ = C_p \cdot dT \quad \therefore C_p = \frac{dQ}{dT} = \frac{dU}{dT} + p \frac{dV}{dT} = C_v + p \frac{dV}{dT} \quad \text{④}$$

ところで、気体の状態方程式を $p = (\text{一定})$ の条件で微分を求めると、次の式が得られます。

$$pdV = RdT \quad \therefore R = p \frac{dV}{dT} \quad \text{⑤}$$

④式と⑤式から、定容比熱と定圧比熱の関係は次のように表せます。

$$C_p - C_v = R \quad (6)$$

定容比熱と定圧比熱の比を比熱比と呼び、次式で定義します。

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{C_v + R}{C_v} \quad (7)$$

外から熱を与えない場合の気体の変化を考えることにします。これは、②式において $dQ = 0$ とした場合になります。

$$dU + pdV = C_v \cdot dT + pdV = 0 \quad (8)$$

気体の状態方程式の微分を求めると次の通りです。

$$pdV + dpV = RdT \quad (9)$$

⑨式を用いて⑧式から dT を消去すると次の式を得ます。

$$\frac{C_v + R}{C_v} \cdot \frac{dV}{V} + \frac{dp}{p} = \gamma \frac{dV}{V} + \frac{dp}{p} = 0 \quad (10)$$

⑩式を積分すると次式を得ます。

$$\gamma \ln V + \ln p = \ln V^\gamma + \ln p = \ln pV^\gamma = \text{const.} \quad \therefore pV^\gamma = \text{const.} \quad (11)$$

⑪式を Poisson（ポアソン）の法則と言います。⑪式に気体の状態方程式①を使って V を消去すると次式を得ます。

$$T = a \cdot p^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad a \text{ は比例定数} \quad (12)$$

⑫式は断熱変化をする気体の温度と圧力の間係を示しています。これを使って実際の地球の温度を計算してみます。地球大気の比熱比は $\gamma = 1.4$ です。気温（地上 1m 程度の大気温度、 $p = 1\text{atm} = 1013\text{hPa}$ ）が 15°C （288K）とします。これを⑫式に代入すると、

$$288 = a \cdot 1^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad \therefore a = 288 \quad (13)$$

大気は乾燥しているとして、標高 1000m、気圧 $900\text{hPa} = 0.888\text{atm}$ の山頂の気温を計算してみます。⑫式と⑬式から

$$T = 288 \cdot 0.888^{\frac{0.4}{1.4}} = 278.4K = 5.4^{\circ}\text{C} \quad (14)$$

つまり、標高 1000m 当たりに $(5.4 - 15) = -9.6^{\circ}\text{C}$ だけ気温が低下することになります。これは 2-2 で紹介した地球大気の乾燥温度減率と呼ばれるものです。

さて、金星の表面気圧は 92 気圧程度、気温は 470°C (743K) 程度といわれています。金星大気は CO_2 が 100% で構成されているものとし、比熱比 $\gamma = 1.30$ とします。

$$743 = a \cdot 92^{\frac{0.3}{1.30}} \quad \therefore a = 261.7 \quad (15)$$

この金星表面大気を断熱的に地球の表面気圧にまで減圧した場合の温度を求めてみます。

$$T = 261.7 \cdot 1^{\frac{0.3}{1.30}} = 261.7K = -11.3^{\circ}\text{C} \quad (16)$$

つまり、金星の表面温度が高温なのは、分厚い CO_2 の大気に包まれた金星表面における「大気圧が高いこと」であって、 CO_2 の温室効果とはまったく関係ないのです。

2-4 過去のデータや観測値における CO₂ 濃度と気温の関係

(1) 南極氷床に残された過去の大気からの分析

南極の氷床は、南極に降り積もった雪が自らの重さで押し固められたものです。雪が降った時代の大気を氷床の中に閉じ込めています。氷床から切り出した氷柱＝アイスコアから気体を抽出して分析することによって様々な過去の大気の状態が分かります。時間的な解像度が低いことなどの限界はありますが、数十万年に及ぶ長期間の気候変動の定性的な記録としては重要です。

ふじ基地の最新の分析では 70 万年ほどの記録が復元されています。

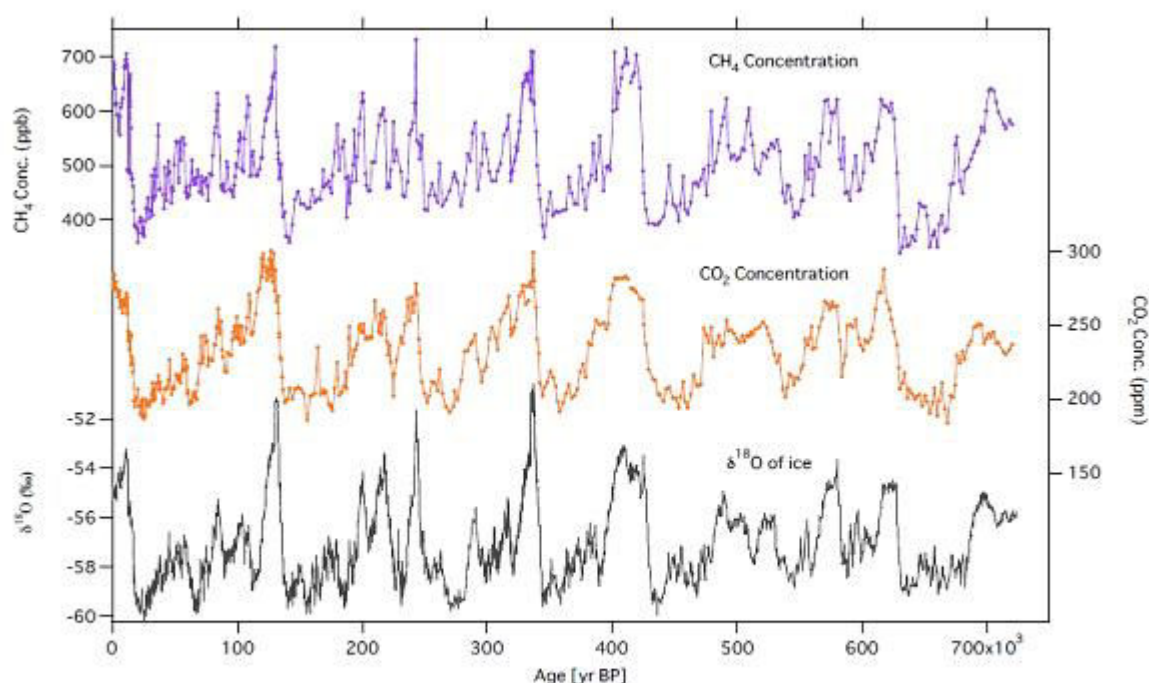
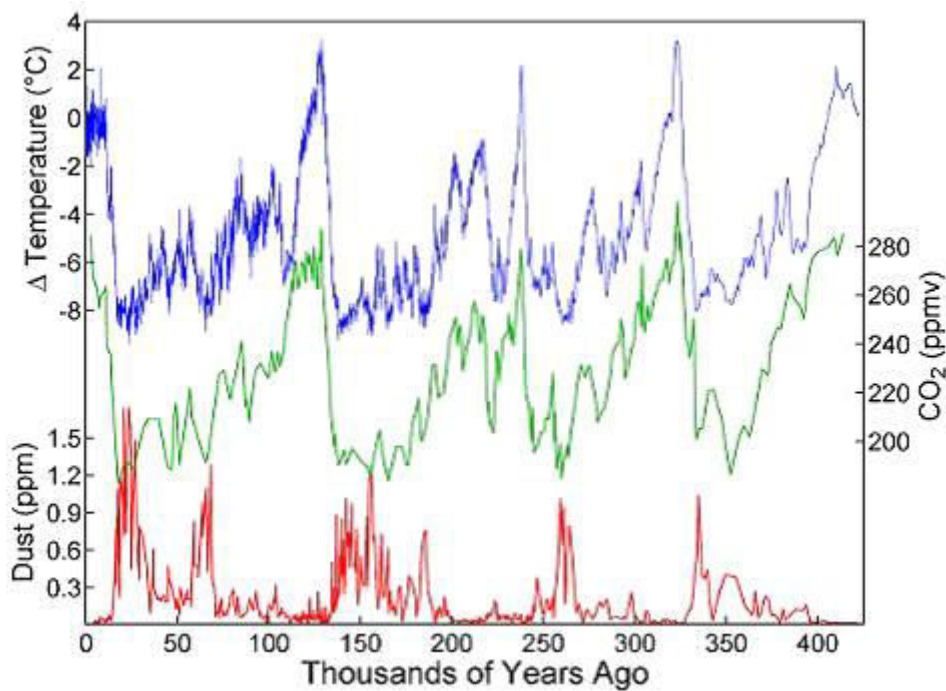


図 1. ドームふじ深層氷床コアから得られた過去 72 万年間の CH₄ 濃度（紫色の点）と CO₂ 濃度（オレンジ色の点）の変動。下部に氷の $\delta^{18}\text{O}$ も示す。

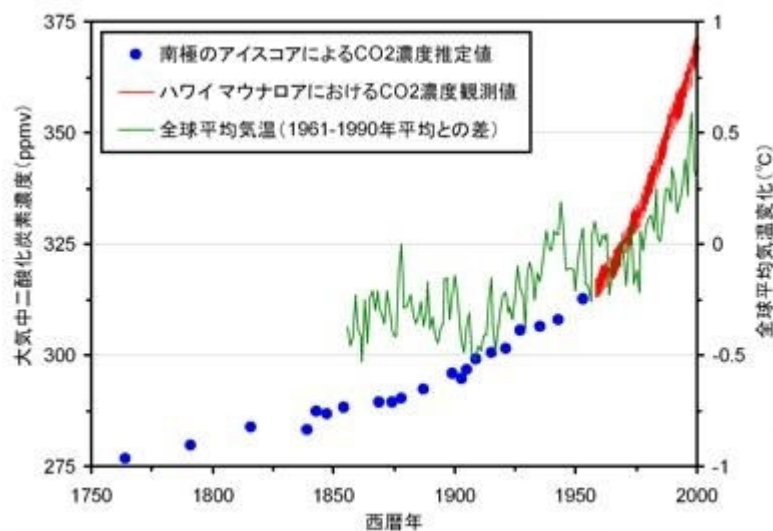
酸素の同位体 ^{18}O の同位体比率は気温の尺度として用いられます。図からわかるように、気温変動にともなって CO₂ だけでなくメタン CH₄ の大気中濃度も変動していることがわかります。この変動は、気温の上昇にともなって海洋や地球の表面環境から CO₂ や CH₄ が大気中に放出されたと理解されています。つまり、**気温変動が原因となって、その結果として CO₂ や CH₄ の大気中濃度が変化している**のです。

もう一つボストーク基地のデータを示しておきます。



ボストーク基地のデータには粉塵(Dust)の濃度も記されています。粉塵の大気中濃度は気温と逆相関の関係を示しています。つまり、気温が低い時期ほど大気中の粉塵量が多くなっているのです。これは気温の低下は陸上環境の乾燥化を引き起こしていることを示していると考えられます。

(2) C.D.Keeling の CO₂ 濃度精密観測



現在の人為的 CO₂ 地球温暖化仮説が蔓延する重要な契機となったのが、1960 年代にハワイのマウナロア山において C.D.Keeling のグループによって開始された大気中 CO₂ 濃度の精密観測です。

前頁の図は南極のアイスコアを用いた大気中 CO_2 濃度の分析結果に Keeling による直接観測データをつないで示した CO_2 濃度の経年変化に全球平均気温の変動を重ねたものです。これを見て、果たして CO_2 濃度変動と気温変動が同期しているのか、何らかの因果関係があるのか、判断することは無理だと私には思えます。まして、 CO_2 濃度変動が原因となって結果として気温が変動しているなど、とても言えるはずはありません。

驚くべきことですが、現在言われている CO_2 地球温暖化仮説の観測的な事実による裏付けとは『1800 年代後半から現在にかけて長期的に見ると大気中 CO_2 濃度と気温は共に上昇傾向を示している』ということだけなのです。

南極のアイスコア分析から、古気候学においては気温変動が原因となって大気中 CO_2 濃度が増加するということが共通認識ですが、なぜ近年の気温の上昇傾向に関してはその原因と結果が逆転するのか、まったく理解に苦しみます。

主題とは外れますが、上図の南極アイスコア分析による大気中の CO_2 濃度についても明らかな捏造が発覚しています。

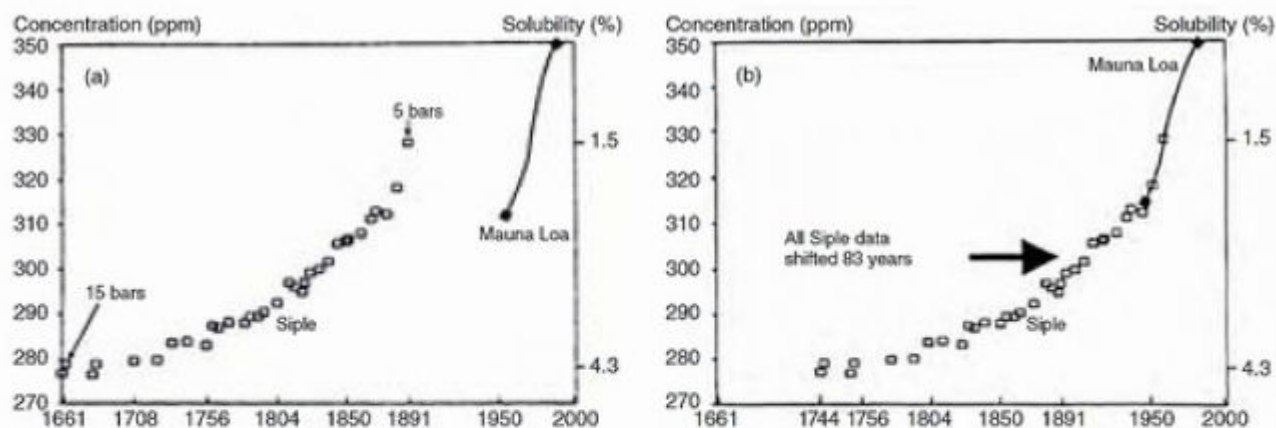


Figure 4
MOTHER OF ALL CO_2 HOCKEY CURVES

Concentration of CO_2 in air bubbles from the pre-industrial ice from Siple, Antarctica (open squares), and in the 1958-1986 atmosphere at Mauna Loa, Hawaii (solid line). In (a), the original Siple data are given without assuming an 83-year-younger age of air than the age of the enclosing ice. In (b), the same data are shown after an arbitrary correction of the age of air.

Source: Adapted from Friedli et al. 1986 and Neftel et al. 1985

上の左側の図が南極アイスコアの分析による CO_2 濃度と Keeling による観測結果の元々の分布です。前に示した CO_2 濃度の経年変化として広く紹介されている曲線は、左側の図を元に右側の図のように南極アイスコアの分析結果を 83 年間シフトして無理矢理に滑らかにつないだもののなのです。

Keeling は自らのマウナロア山と南極における大気中 CO_2 濃度の連続観測データを基に、長期的な傾向と季節変動を取り除き、短周期の変動を平滑化し、これを気温変動と比較することによって次の図を発表しました。

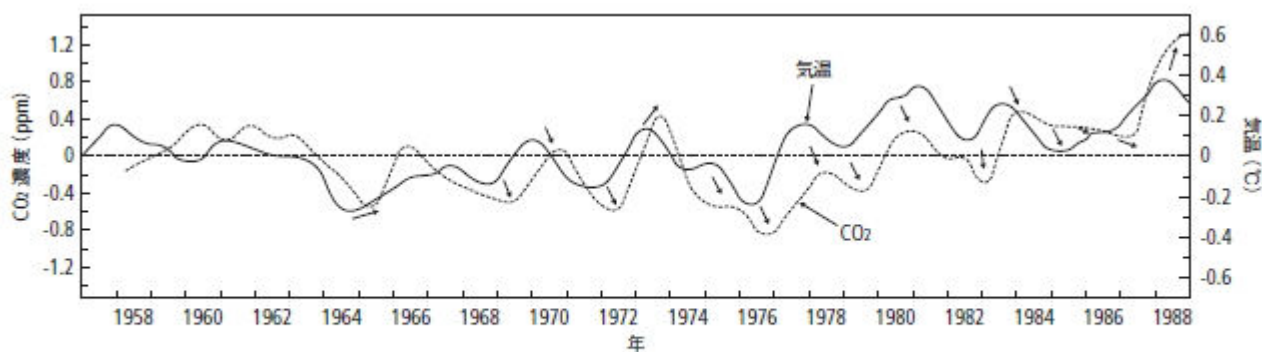


図6 観測値から長期的上昇傾向と季節変化を取り除いた大気中二酸化炭素濃度変動と気温変動の関係
(出所：根本 (1994) , p.151)

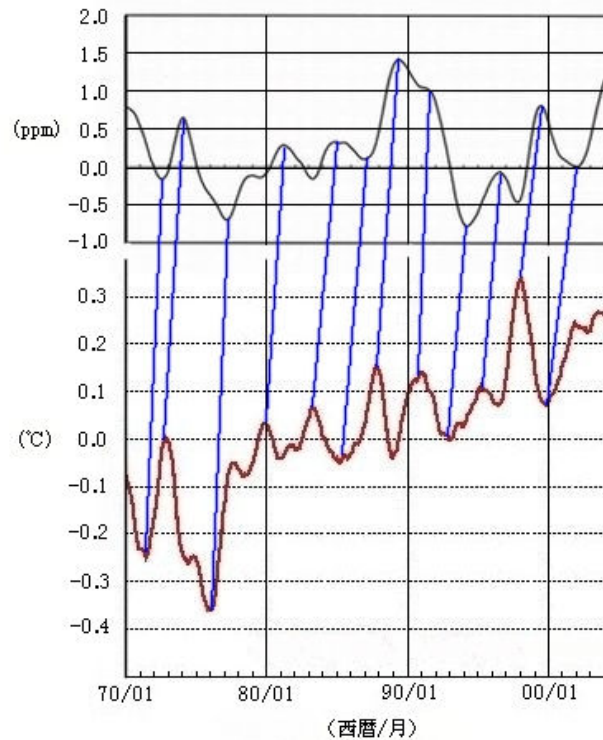
この2つの曲線を比較すれば、曲線の特徴点（例えば極大・極小点など）の比較から、明らかに何らかの関連性があることがわかります。しかも、特徴点の出現の順序は例外なく気温が先でCO₂濃度が後に現れているのです。つまり、この **Keeling** の分析の範囲において『長期的傾向と季節変動を取り除いた数年スケールの変動において、気温変動が原因となって結果として大気中CO₂濃度が変動している』ことがわかります。

南極アイスコアの数万年の長期間にわたる大気中CO₂濃度の分析結果とKeelingによる数年周期の大気中CO₂濃度の分析結果は、共に気温変動が原因となって大気中CO₂濃度が変動することを示しています。これから類推すれば、その間の時間スケールにおいても気温が原因となって大気中CO₂濃度が変動すると考えるのが妥当であろうと思います。ところが、気象学会の専門家たちは10～100年の時間スケールにおいては、大気中のCO₂濃度の変動が原因となって気温が変動すると強弁しているのです。

(3) 解明された気温と大気中CO₂濃度の関係

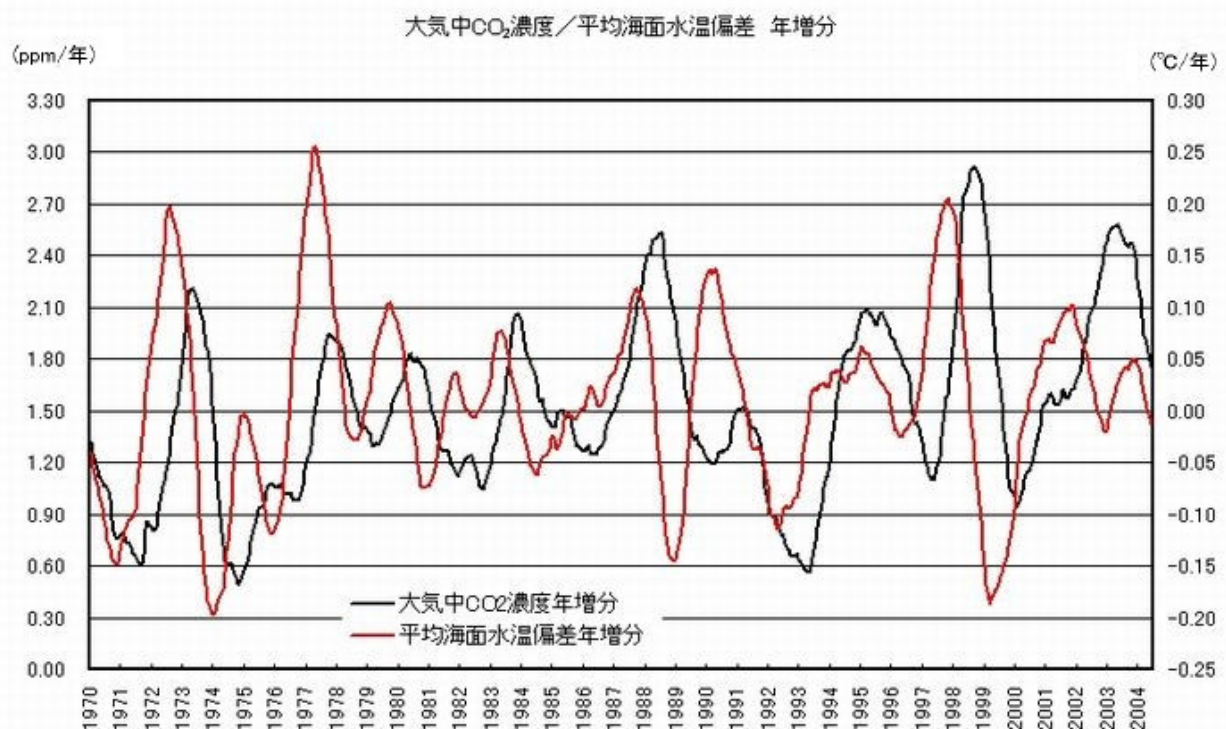
そこで、熱物理学の槌田敦氏と私は、Keelingが恣意的に取り除いた“長期的傾向”を含めて分析することにしました（2006年）。まず始めに、ネット上に公開されていた海面水温と大気中CO₂濃度の経時変化のグラフを同じ時間スケールで比較することから始めました。

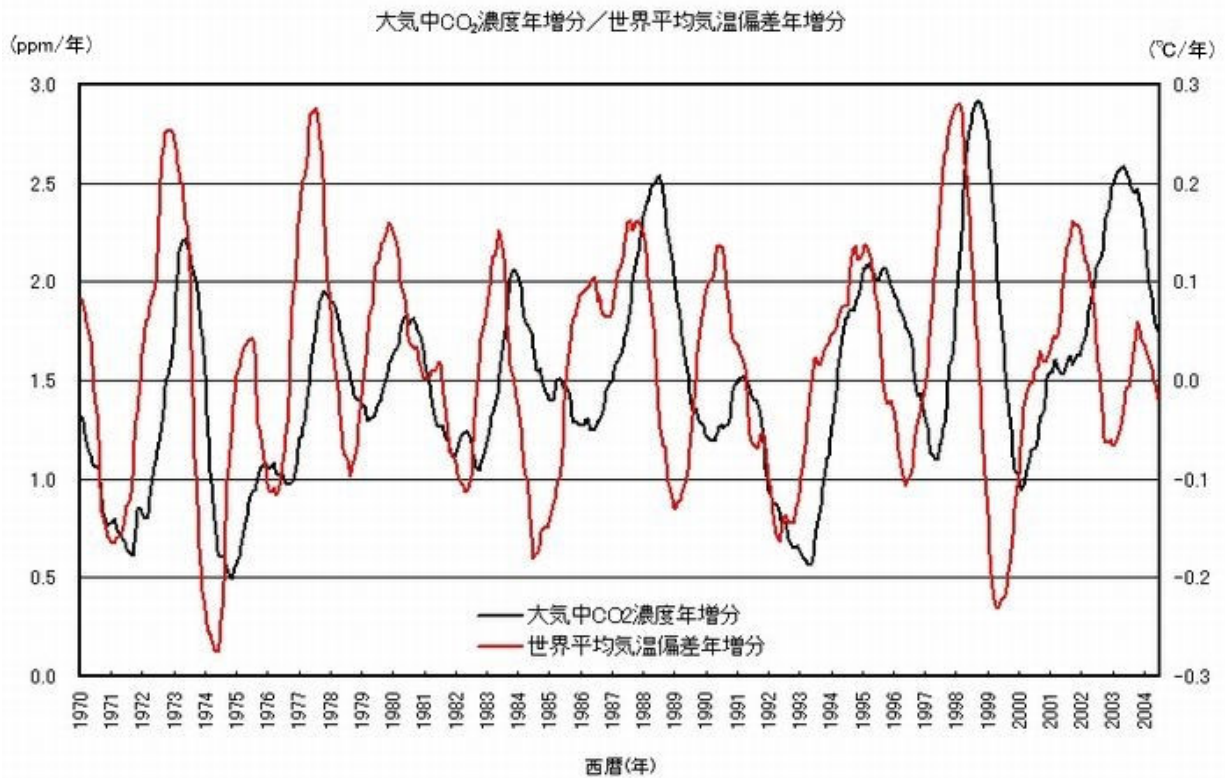
二酸化炭素濃度の短期変動と海面水温



グラフから明らかなように特徴点の発現は **Keeling** のグラフ同様、海面水温変動が起こった後に CO_2 濃度の変動が起こることが分かります。

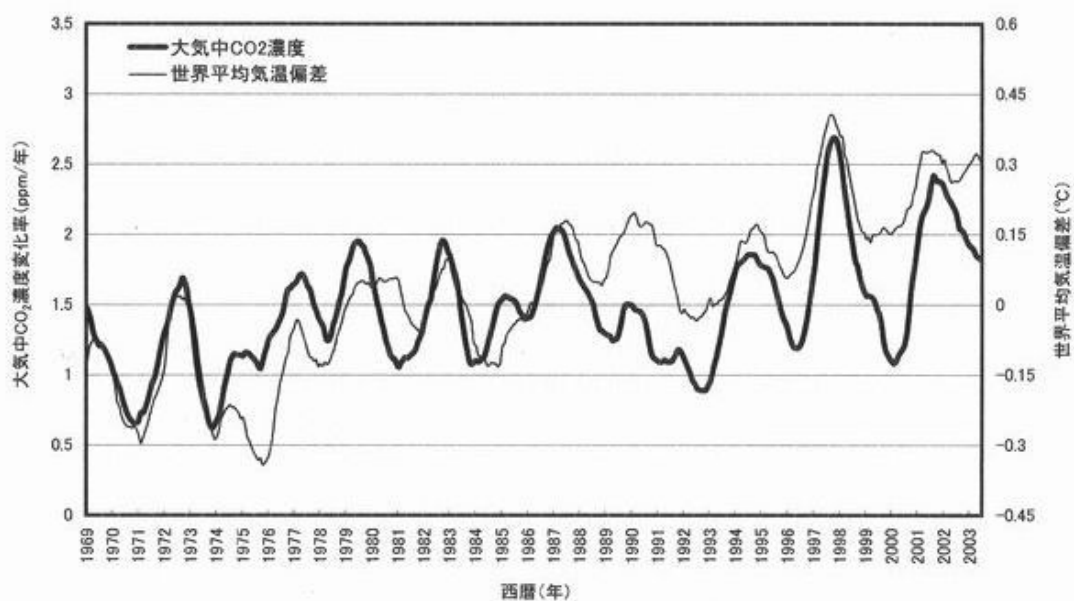
次に、詳しい分析を行うために気象庁から海面水温の生データを取り寄せ、同じく気象庁による気温データ入手し、これと **Keeling** の CO_2 観測データについて、それぞれ年増分（微分係数あるいは曲線勾配の近似値）を求めて比較することにしました。





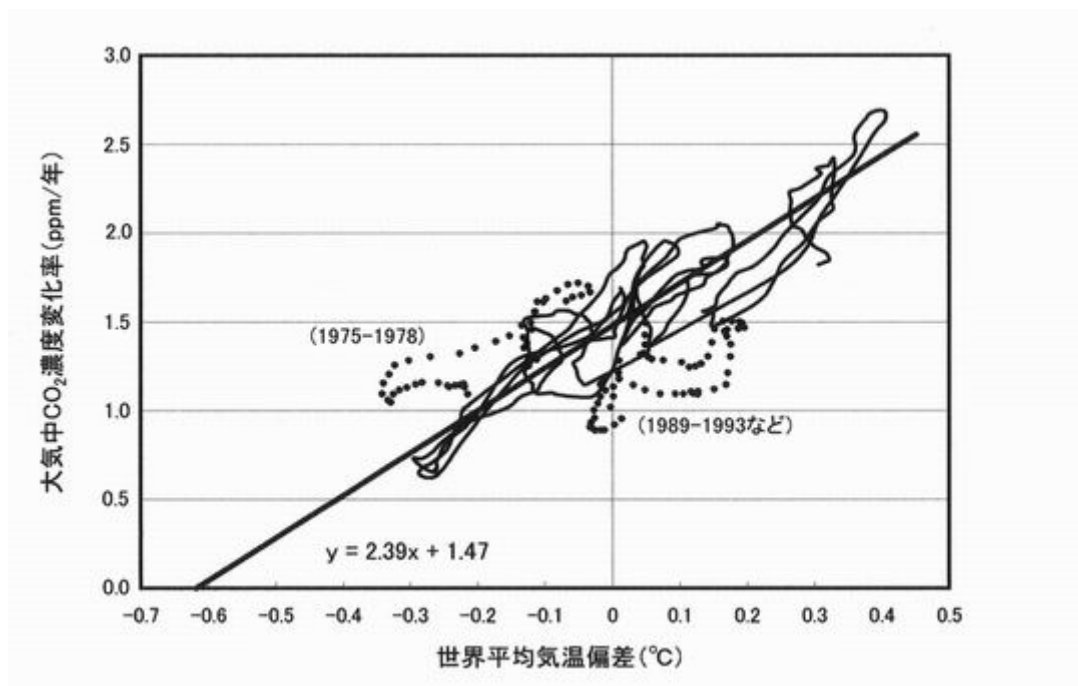
結果は当然ですが、長期的な傾向を取り除くことなく、海面水温ないし気温の変動の後に大気中 CO₂ 濃度が変化することが明らかになりました。この結果は槌田が物理学会誌に報告しました（日本物理学会誌 Vol.62, No.2, 2007）。

この結果から、数十年スケールの変動においても気温変動が原因となってその結果として大気中 CO₂ 濃度が変動することが確定しました。ただ、気温の変動から CO₂ 濃度の変動が起こるまでの遅延時間が 1 年程度というかなり長い時間がかかる理由が疑問でした。



槌田は、この遅延時間は単に CO₂ を放出する反応に時間がかかるのではなく、気温の変動が「CO₂ 放出速度 $\div$ CO₂ 濃度の時間変化率」を変化させているのではないかと推測し、分析を行った結果が前頁の図です。

予想通り、気温変動と大気中 CO₂ 濃度の時間変化率が同期することが明らかになりました。その関係を更に明らかにするために、横軸を気温、縦軸を大気中 CO₂ 濃度の時間変化率にとった散布図にまとめたのが次の図です。



散布図の回帰直線から、大気中 CO₂ 濃度 F の時間変化率 $\partial F/\partial t$ は、気温（世界平均気温偏差） T の一次関数で与えられることがわかりました。

$$\partial F/\partial t = 2.39T + 1.47 = 2.39(T + 0.615) \quad (\text{ppm/年})$$

上式から、気温が 1°C 上昇すると大気中 CO₂ 濃度の年間増加量が 2.39ppm 増加し、世界平均気温が現在よりも 0.615°C 低下すると大気中 CO₂ 濃度の増加が停止することが分かりました。

この結果を日本気象学会誌『天気』に投稿しましたが、気象学会誌編集委員会は天気への掲載を拒否し続けています。その後、同様の内容について槌田は物理学会誌に投稿して掲載されました（日本物理学会誌 Vol.65 No.4）。

以上の検討から、理論的にも、また観測事実としても大気中 CO₂ 濃度の上昇による気温上昇は存在せず、逆に気温の上昇が大気中 CO₂ 濃度を高くしていることが確認されたのです。

2-5 大気中 CO₂ 濃度はどのように決まるか

オゾンホールによる健康被害はまったく杞憂であること、CO₂ 地球温暖化は論理的にも観測事実からも存在しないことが明らかになりました。これまで、高校教科書の現代社会の記述を中心に検討してきましたが、ほとんど同様の内容が地理の教科書にも記載されています。

さて、生物の教科書においても気温上昇の主要な原因を大気中 CO₂ 濃度の上昇による温室効果の増大が原因であるとしていますが、まがりなりにも科学系の教科なのですから、社会科の教科と同レベルの説明しかせず、CO₂ 地球温暖化を正しいものとして説明していることは、怠慢の誹りを受けても仕方ないように思います。

また、仮に CO₂ の温室効果による温暖化が『事実』だったとしても、大気中の CO₂ 濃度の増加の主因が人為的な影響でなければ、現在温暖化対策として政策化されている各種の事業はすべて無駄ということになります。その意味で、大気中の CO₂ 濃度と化石燃料の燃焼による CO₂ の人為的な放出との関係を科学的に明らかにしておくことが必要です。

この点についても、高校の生物の教科書では論理的な背景の説明抜きで国家の主張を追認しています。例えば次のような主張です。

■ A 地球温暖化とその対策 ■ 大気中の水蒸気や二酸化炭素は、地表から放射される赤外線を吸収し、その一部を地表に再放射して地表や大気の温度を上昇させる。これを大気による 温室効果 といい、温室効果を引き起こす原因となる大気中の水蒸気や二酸化炭素、メタン、フロンなどは温室効果ガスとよばれている。

「近年、地球の年平均気温が上昇しており(図 20 左)、大気中の二酸化炭素の増加(同図右)に伴う温室効果の増大がそのおもな原因と考えられている。21 世紀の末には、20 世紀の末と比べて、大気中の平均二酸化炭素濃度は約 2 倍、地球の平均気温は 1.8 ~ 4.0℃ほど上昇する可能性があるとの報告もある。地球の温暖化は海水面の上昇をもたらし、海岸沿いにあった干潟や砂浜などが消失してしまうことが予想される。また、陸上の生態系でも、気温の上昇によって生育に適した環境が変化してしまった場合、その環境に適応できない生物が大量に絶滅することが予想される。

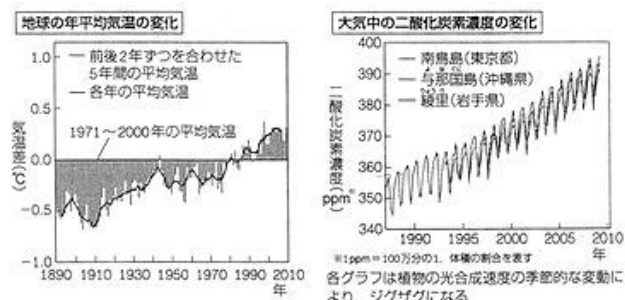
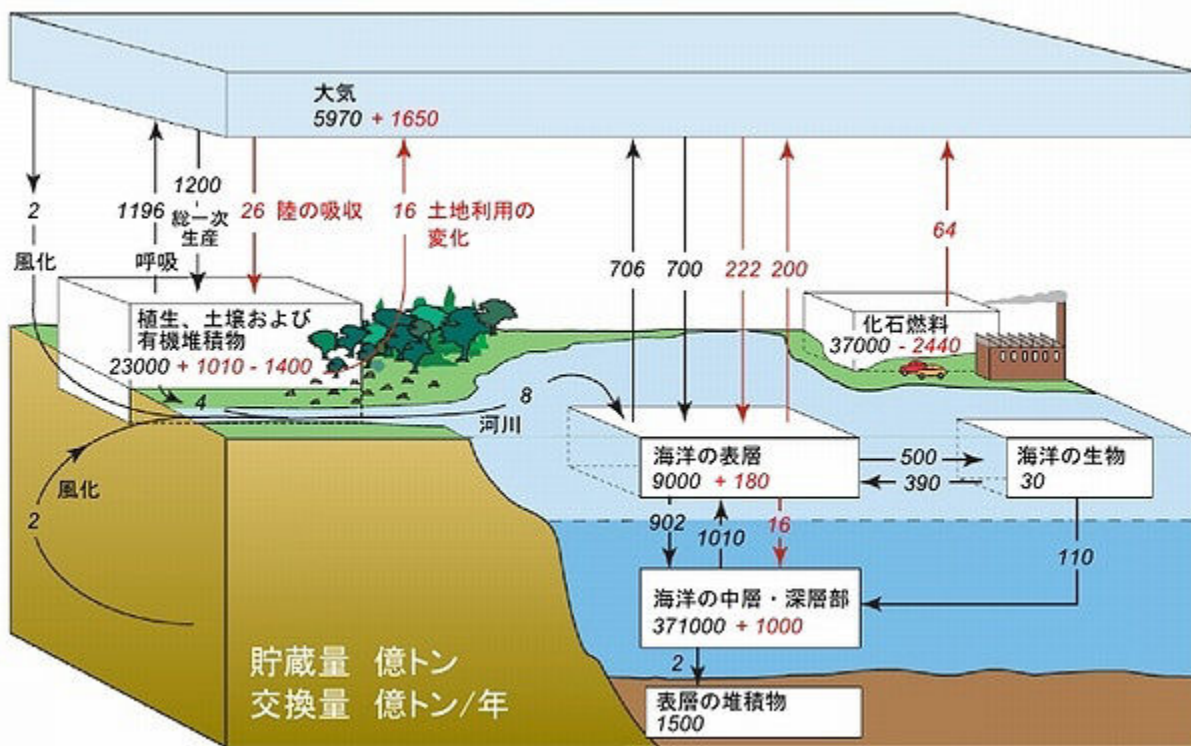


図 20 地球の年平均気温の変化(左)と二酸化炭素濃度の年変化(右)

大気中の二酸化炭素濃度は、おもに光合成による吸収と呼吸による排出によってバランスが保たれているが、近年の二酸化炭素濃度の増加は、石油などの化石燃料の大量消費による排出量の増加と、大規模な熱帯林の破壊による吸収量の低下がおもな原因と考えられている。このため、二酸化炭素の排出を規制し、植林面積を広げようとする世界的な動きがあり、1997 年に開かれた地球温暖化防止のための京都会議では、排出量の削減に関する議定書が締結された。

この点について検討することにします。

(1) IPCC2007 年報告における炭素循環図



上図は IPCC2007 年報告に記載された炭素循環の概要です。黒の文字は産業革命以前の“自然の炭素循環”であり、赤い文字はその後の“変化量”を示しています。

図の数値をまとめると、地表環境（海洋、陸域、人為的な放出を含む）から炭素重量に換算して年間 $q_{in}=218.2\text{Gt/年}$ （Gt：ギガトン＝10 億トン）の CO_2 が大気中に放出されています。その内、119.6Gt/年は生物の呼吸であり、90.6Gt/年は海洋からの放出です。

同様に地表環境は大気中から年間 $q_{out}=215\text{Gt/年}$ の CO_2 を吸収しています。その内、120Gt/年は光合成による吸収であり、92.2Gt/年は海洋による吸収です。

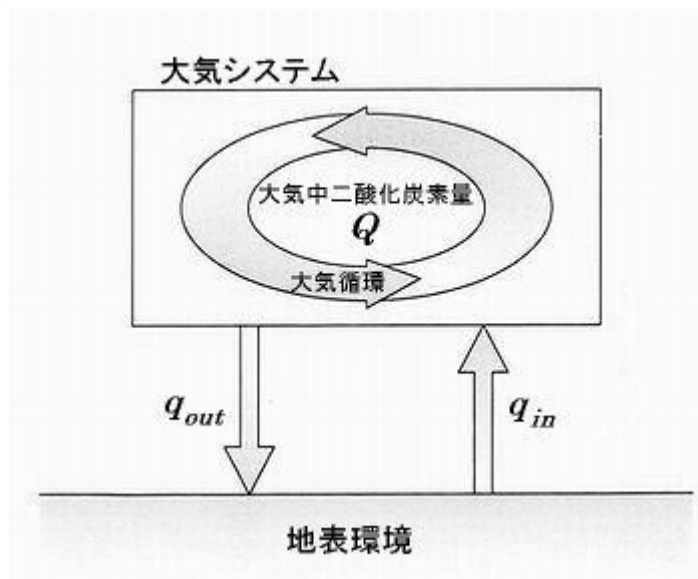
その結果、大気中には概ね $Q=762\text{Gt}$ の CO_2 （炭素重量換算）が存在し、年間 3.2Gt/年程度増加しています。

さて、生物の教科書の記述では『大気中の二酸化炭素濃度は、おもに光合成による吸収と呼吸による排出によってバランスが保たれている』としていますが、これは誤りです。**海域における無機的なガス交換によって光合成や呼吸に匹敵する CO_2 が大気と海面の間で循環している**のです。また、当然ですが光合成や呼吸という生物反応に比較して無機的な化学反応の方が環境変化に対する応答が早く、大気中の CO_2 濃度の変動に対して海域におけるガス交換のほうが迅速に対応して変動を緩和すると考えられます。

また、教科書の記述では『近年の二酸化炭素の増加は石油などの化石燃料の大量消費による排出量の増加と、大規模な熱帯林の破壊による吸収量の低下がおもな原因と考えられている。』としていますが、化石燃料消費、土地利用の変化による CO_2 放出増加量はそれぞれ、6.4Gt/年、1.6Gt/年程度と小さく、大気中に含まれる CO_2 量を劇的に増加させる要

因ではありません。この点について以下に検討します。

(2) CO₂ 循環モデル



炭素循環図から明らかなように、大気中に含まれている 762Gt の CO₂ の内、年間 215Gt/年ほどが入れ替わっています。大気中に含まれる CO₂ 量 Q の時間 t に対する変化率と、地表環境の年間 CO₂ 放出量 q_{in} と年間吸収量 q_{out} の間には次の関係があります。

$$dQ/dt = q_{in} - q_{out}$$

q_{out} とは大気に含まれる CO₂ に対する物理・化学的あるいは生物学的な吸収反応による CO₂ 吸収量の合計値です。無機的な物理・化学反応速度は質量作用の法則から大気中に含まれる CO₂ 分圧に比例します。大気中 CO₂ 濃度の低い現状の大気では光合成も CO₂ 濃度に比例すると考えられます。そこで、比例定数を r として $q_{out} = r \cdot Q$ と表すことができます。故に

$$dQ/dt = q_{in} - r \cdot Q$$

この微分方程式を q_{in} 、 r が一定という条件のもとに解くと一般解は次のように求められます。

$$Q = q_{in}/r + C \cdot \exp(-rt)$$

$t \rightarrow \infty$ として定常解を求めると次の通りです。

$$Q = q_{in}/r$$

厳密には、 q_{in} あるいは r は t の関数と考えられますが、変化は小さいのでこの定常解を使って現状を解釈することが可能です。

IPCC2007 年の炭素循環図の数値から、 $q_{out} \doteq q_{in} = 218.2 \text{ Gt/年}$ として近似することになります。

$$1/r = Q/q_{in} = 762(\text{Gt})/218.2(\text{Gt/年}) \doteq 3.49 \text{ 年}$$

$1/r$ を平均滞留時間と呼びます。一般解において $t=0$ 、 $Q=762 \text{ Gt}$ 、 $q_{in}=0$ 、つまり、現状の大気中 CO_2 濃度を初期状態として、地表環境からの CO_2 供給を止めた場合について、その後の大気中の CO_2 量がどのように変化するかを示す式を求めると次の通りです。

$$Q = 762 \exp(-t/3.49) \quad (\text{Gt})$$

上式から、平均滞留時間が経過すると大気中の CO_2 残留量は、

$$Q = 762 \exp(-1) = 762 \times 0.368 \quad (\text{Gt})$$

つまり初期状態の $(1 - \exp(-1)) = 63.2\%$ が入れ替わります。平均滞留時間の 3 倍が経過すると $(1 - \exp(-3)) = 95.0\%$ が入れ替わります。現状の地球大気では、10 年も経過すれば大気中に含まれる CO_2 はほとんどすべて入れ替わるのです。

一旦大気中に放出された CO_2 は放出源の如何、あるいはいつ放出されたのかを問わず、同一の確率 r で地表面環境に吸収されます。人為的 CO_2 地球温暖化仮説では、産業革命以後の 200 年間に人為的に化石燃料の燃焼によって大気に放出された CO_2 の半量程度が“選択的に”毎年毎年大気中に蓄積され続けた結果として大気中 CO_2 濃度が急上昇したと主張していますが、そんなことはあり得ないのです。

(3) 化石燃料の燃焼量を減らしても CO_2 濃度の変化は微小

現在、人為的 CO_2 地球温暖化対策として、化石燃料の燃焼を削減する政策が取られていますが、その効果を検証することになります。前節で求めた大気中 CO_2 量の一般解から、現在の大気中に含まれている人為起源の CO_2 量は、年間放出量の 3.49 年分程度ですから、 $6.4(\text{Gt/年}) \times 3.49(\text{年}) = 22.336(\text{Gt})$ 程度、全体の $22.336(\text{Gt})/762(\text{Gt}) = 2.93\%$ に過ぎません。仮に、人為的 CO_2 放出量を 20% 減らすことができた場合、

$$q_{in} = 218.2(\text{Gt/年}) - 6.4(\text{Gt/年}) \times 0.20 = 216.92(\text{Gt/年})$$

故に、定常状態に到達した時の大気中 CO_2 量は次の通りです。

$$Q = 216.92(\text{Gt/年}) \times 3.49(\text{年}) = 757.05 \quad (\text{Gt})$$

現状の大気中 CO₂ 濃度を 390ppm とした場合、人為的 CO₂ 放出量を 20% 減らした場合の大気中 CO₂ 濃度は

$$390\text{ppm} \times (757.05/762.0) = 387.5\text{ppm}$$

わずか 2.5ppm しか CO₂ 濃度を減らせないので。人為的な CO₂ 放出量の削減対策などまったく役に立たないので。

(4) ヘンリーの法則と化学平衡

高校の化学で習うヘンリーの法則を紹介しておきます。

「一定温度のもとで、溶解度の小さい気体が一定量の溶媒に溶けると、気体の溶解度（物質量、質量）は、その気体の圧力に比例する。」

ここではヘンリーの法則を化学平衡という視点から考えることにします（HP『未来への化学』石黒泰氏の解説から紹介します。 ）。

今、CO₂ を含む空気と水を接触させて十分時間が経過して、空気中の CO₂ 量と水に溶けている CO₂ 量が平衡状態に達しているものとします。

水溶液中のモル濃度：[CO₂(水)]=m

空気中のモル濃度：[CO₂(気)]=n

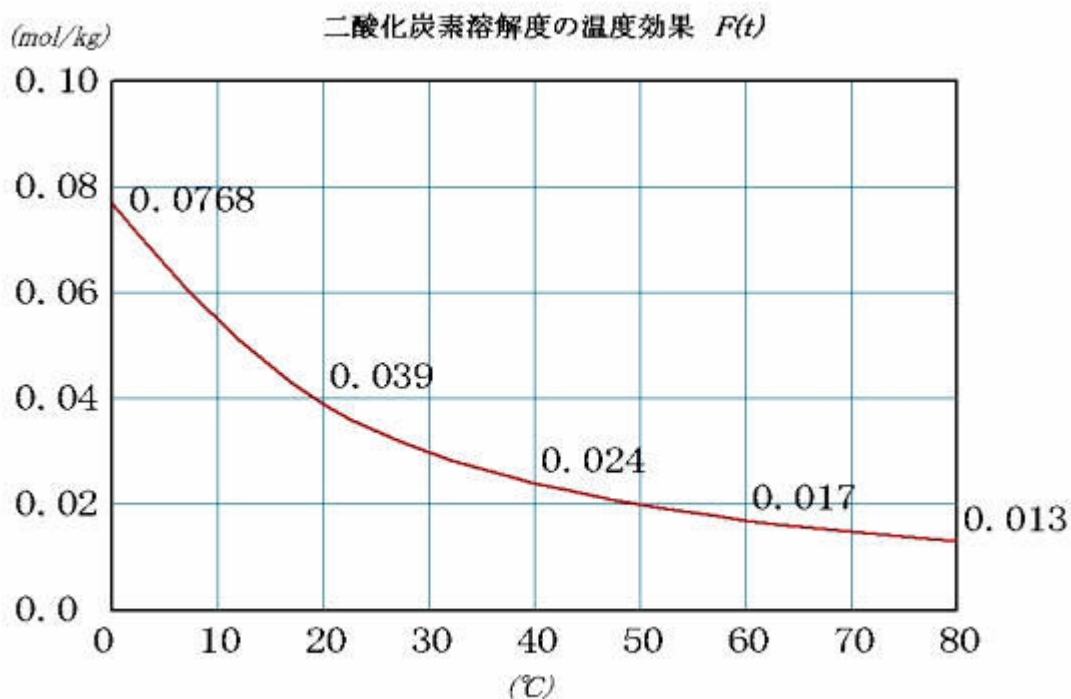
今、平衡状態にあるので平衡定数 K は、 $K=n/m$ になります。

一方、気体の状態方程式より、 $P=nRT$ （ $\because n$ はモル濃度）になります。以上から、

$$K=n/m=\{P/(RT)\}/m \quad \therefore m=(1/R)\{P/(KT)\}$$

上式を解釈すると、水に溶解する CO₂ のモル濃度は、気温が一定の場合（KT が一定の場合）、CO₂ 分圧 P に比例することになります。これがヘンリーの法則です。

逆に、水に溶解する CO₂ 量は、P が一定の場合、平衡定数 K と気温 T の積に反比例するのです。気温の変化が小さく K の変化が無視できるのならば、T に反比例することになります。つまり、**気温が上昇するほど水の中から CO₂ が放出されることになるのです**。実際の CO₂ の溶解度は次のグラフの通りです。



(5) 大気中 CO₂ 濃度上昇の原因は気温上昇

前節では、水圏における化学的あるいは無生物的な CO₂ の挙動を考えました。

更に、気温≒表面海水温が上昇することによって浅海部での生物・化学反応が活性化されることで浅海部における有機物の分解や呼吸が増加し、海洋表層水中への CO₂ の供給量が増加し CO₂ 濃度は高い状態が維持されることになるでしょう。これによって、更に海から大気中に放出される CO₂ の放出速度が上昇することになります。

これまで見てきたように、大気中の CO₂ 濃度が上昇したから気温が上昇したのではなく、気温が上昇したから大気中の CO₂ 濃度が上昇したのです。2-4 で紹介した観測事実はそれを事実として示しているのです。

以上を総合すると、小氷期が終わって以降、200 年間程度続いている気温の回復過程＝継続的な気温の上昇によって、第一に海洋からの CO₂ 放出速度が上昇し、あわせて陸上生態系の活性化、あるいは有機堆積物の分解速度の上昇などが大気中の CO₂ 濃度上昇の主要な原因だと考えられます。

補足) 大気中 CO₂ 濃度の離散的な表現 (植田による級数モデル)

本文では、CO₂ 循環モデルを微分方程式で説明しました。実際の大気中の CO₂ 濃度は 1 年周期の季節変動や地域による特性があります。そこで、1 年毎のまとまりとしての離散的な表現によって説明することを考えます。

初期状態において大気中に含まれている CO₂ 量を $Q_0(\text{Gt})$ とし、年間残存率を $(1-r)$ とします。地表環境から大気に放出される CO₂ 量を $q_{\text{in}}(\text{Gt/年})$ とします。

$$1 \text{ 年目期末 } Q = Q_0 \times (1-r) + q_{\text{in}} \times (1-r)$$

$$2 \text{ 年目期末 } Q = Q_0 \times (1-r)^2 + q_{\text{in}} \times (1-r) + q_{\text{in}} \times (1-r)^2$$

...

$$n \text{ 年目期末 } Q = Q_0 \times (1-r)^n + q_{\text{in}} \times (1-r) + q_{\text{in}} \times (1-r)^2 + \dots + q_{\text{in}} \times (1-r)^n$$

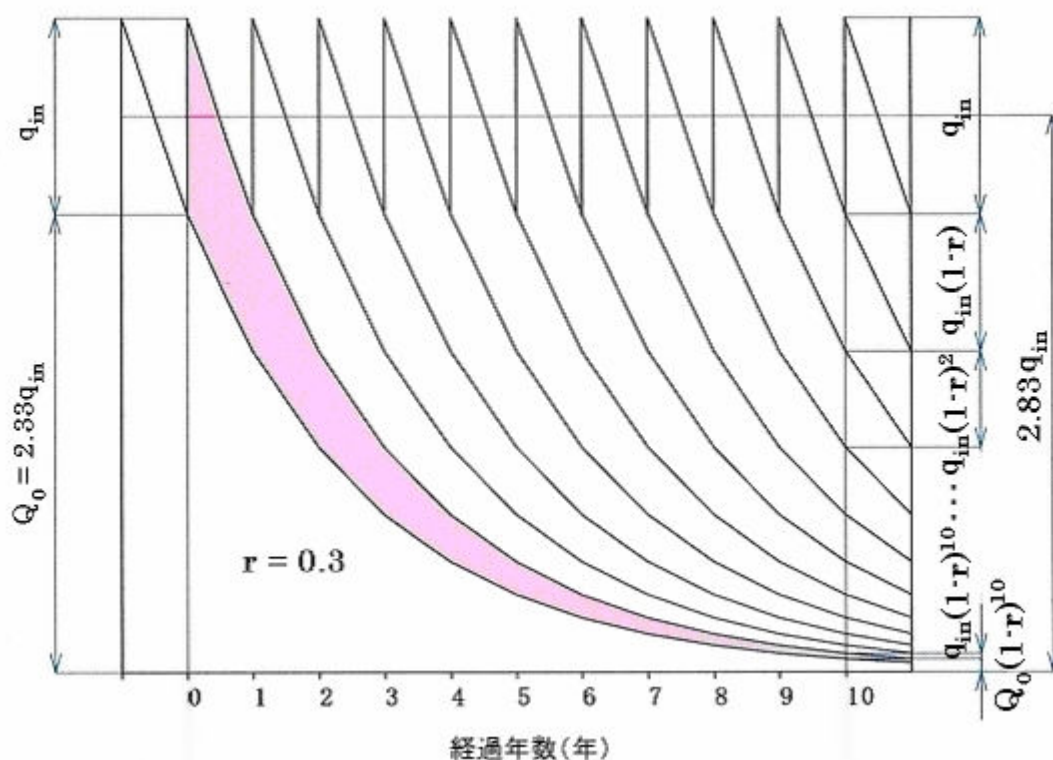
$(n+1)$ 年目期首の大気中の CO₂ は n 年目期末の式に q_{in} を加えることによって求められるので、等比数列の和の公式より次式で計算することが出来ます。

$$Q = Q_0 \times (1-r)^n + q_{\text{in}} \times \{1 - (1-r)^{(n+1)}\} / r$$

大気中の CO₂ 量 Q の定常状態は、 $n \rightarrow \infty$ の極限を求めることによって次のように表すことが出来ます。

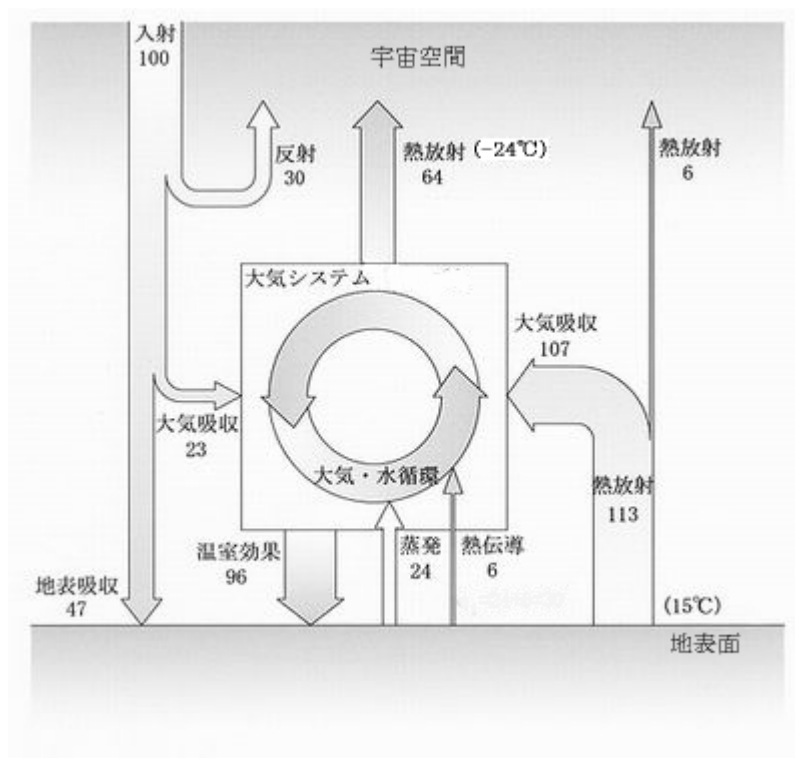
$$Q = q_{\text{in}} / r \quad (= q_{\text{out}} / r), \quad \therefore q_{\text{out}} = Q \cdot r$$

つまり、初期状態 Q_0 の如何に関わらず、定常状態に達したときの CO₂ 量 Q は、地表環境からの入力 q_{in} と交換率 r だけで決まる。



2-6 ヒートアイランド現象

(1) 都市の乾燥化



暖められた地表面は、赤外線放射と熱伝導、そして蒸発潜熱によってエネルギーを放出しています。

いわゆる都市化によって農地を含めて植生が取り除かれ、地表面が舗装で覆い尽くされています。これは大都市ばかりでなく地方都市にまで及んでいます。更に流域下水道の整備によって、雨水は速やかに地表から排除されて暗渠から河川に放流されます。その結果、**都市化・舗装された地域では地表面からの水の蒸発量が激減しています。これがヒートアイランド現象の主要な原因です。**

上図は 341.5W/m^2 を 100 とした時のエネルギーフローを示しています。図の蒸発による潜熱の放出は、地球の平均降雨量を 1000mm/年 として、それが地表面から蒸発するとして求めたものです。都市化によって地表面からの蒸発量が半分になり、減少した潜熱によるエネルギーの放出をすべて地表面放射が担うとした場合の地表面温度をステファン=ボルツマン式で近似的に求めてみます。

$$341.5\text{W/m}^2 \times (113 + 12) / 100 = 426.875\text{W/m}^2$$
$$\therefore T = \{426.875 \div (5.67 \times 10^{-8})\}^{1/4} = 294.6(\text{K}) = 21.6^\circ\text{C}$$

つまり、地表面からの蒸発量が半減するだけで平均気温が 15°C から 21.6°C へ 6.6°C も上昇することになるのです。

例えば、パラグライダーに乗る知人の話によると、山の緑の中で確実に上昇気流があるのは木のない舗装道路の上に行くことだといいます。

また、近年臨海部の大都市部で猛烈な豪雨が頻発するようになりました。これは水蒸気に富んだ海から吹き込む風がヒートアイランド現象で高温化している都市部で加熱されることで強烈な上昇気流となり積乱雲を発達させるからです。

東京などの巨大都市ではこれに加えて人工的なエネルギーの集中消費や高層建築物による気流の障害が高温化をさらに助長していると考えられます。しかし、大部分の地方都市における高温化の主因は地表面環境の乾燥化なのです。

(2) ヒートアイランド対策

ヒートアイランド現象の原因は明らかですから、対策は簡単です。本質的な対策は地表面からの蒸発量を回復することです。できる限り表面舗装を剥ぎ取り、生きた土壌を復活させて豊かな植生を取り戻すことです。また、熱容量の大きな建造物を撤去することも有効です。

つまり、巨大都市を解体して社会的な機能・人口を分散させ、生態系の豊かさの中で生活を営むような社会構造を構築することです。

都市を野放図に巨大化させながら、ヒートアイランド現象を緩和するような虫のいい技術はないのです。高校教育では、技術の限界を科学的に評価するための基礎的な能力や視点を培うことが必要だと考えます。

3. 再生可能エネルギー

これまでの検討で、人為的 CO₂ 地球温暖化は実在しないことが分かりました。故に、温暖化対策という文脈において、人間の社会活動から放出する CO₂ を削減する政策は無意味であり不要なのです。

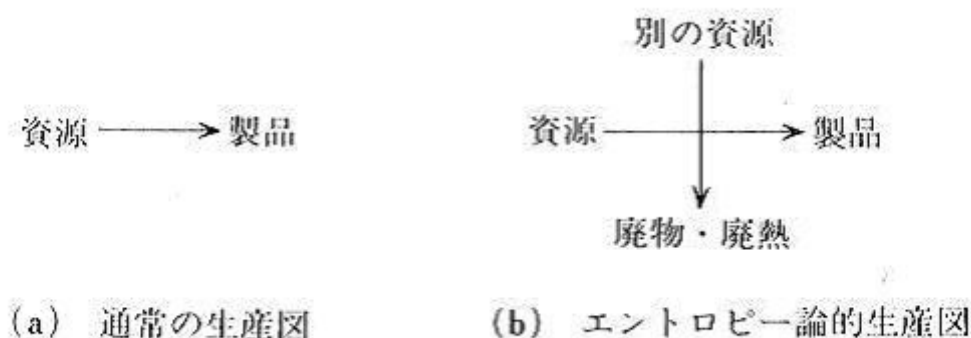
現在の日本における温暖化対策の中核的施策の一つが火力発電から再生可能エネルギー発電へのシフトですが、これも温暖化対策としては無意味であり、不要であることが確定しました。しかし、有限の化石燃料による発電を無尽蔵の自然エネルギーに置き換えることが出来れば、石油文明の壁を破れるのではないかという別の意味もありますので、一概にこれを否定することはできません。

ここでは、再生可能エネルギー発電を始めとする石油代替エネルギー技術を科学的に評価する視点を示すことにします。

3-1 工業生産の理論

工業生産とは、原料資源を工業生産システムに投入して、工業的に供給されるエネルギーや洗浄・冷却用の低エントロピー資源あるいは副次的な鉱物資源などを投入して、原材料資源から不純物を取り除き、工業製品を生産する過程です。工業生産の熱物理学的な解釈について、槌田敦は著書『熱学外論』（1992 年、朝倉書店）において工業生産過程を次のように説明しています。

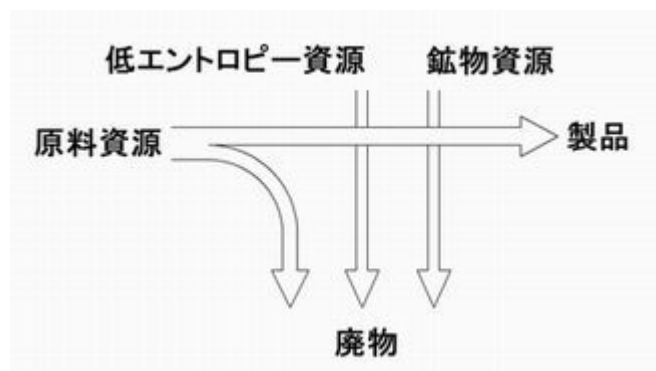
“一般には、鉄は原料の鉄鉱石より作るとして、図(a)のように表現する。しかし、この表現で忘れられているのは、石油、電力、水などの消費であり、また廃物と廃熱の排出である。これをあらわに表現すると図(b)が得られる。ここで、横軸は生産を示している。これに対し、縦軸は消費を示している。この図は、**生産は必ず消費と結合して成立し、全体としてエントロピーの増大である**ことを表している。”



生産活動における資源から製品への流れと廃物・廃熱への流れ

つまり、現在の石油に支えられた工業生産過程では、製品の直接的な原料となる資源のほかに、必ず石油や電力などのエネルギー（資源）と冷却・洗浄用の低エントロピー資源

（水や有機溶剤など）が消費されているのです。槌田の図をもう少し具体的に示してみます。



横方向の流れは製品の直接的な原料資源から製品への流れを示します。生産プロセスにおいて不純物や不要な部分を取り除かれて廃物になります。低エントロピー資源の中には冷却・洗浄用の水や溶剤、それに工業的なエネルギーも含めることにします。低エントロピー資源は原料資源からの不純物や生産プロセスの排熱を取り除きます。鉱物資源には直接製品には含まれない副次的な原材料や工業生産プロセスの機械設備の償却分を含みます。

工業生産とは、原料資源から製品を作り出すだけでなく、その過程で廃物（排熱を含む）を生み出し、総合的にはエントロピーを増大させる物理・化学的なプロセスです。

3-2 発電

工業製品の製造には必ず工業的に供給されるエネルギー資源の消費があります。その結果、工業製品の製品原価の一定割合が投入エネルギー量に対する費用になっています。製品原価に対するエネルギー費用の割合は製品の種類によって概ね決まっています。

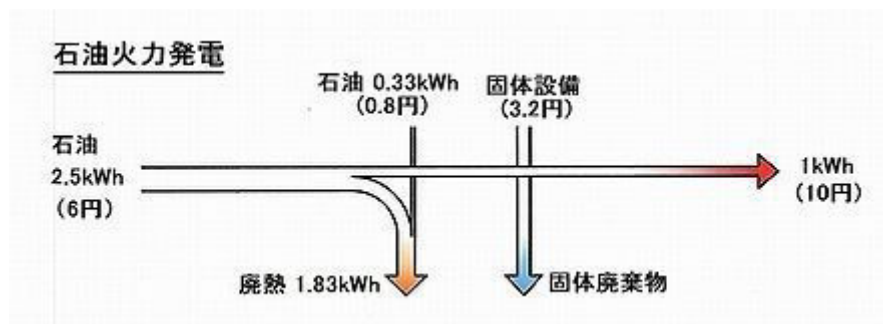
発電とは、原料としてエネルギー（資源）を投入して、工業生産プロセスを通して更に工業的なエネルギーや副次的な原材料資源を投入して加工し、最終的な製品である電力というエネルギーを生産するのです。エネルギー（資源）を投入してエネルギー（電力）を生産する極めて特殊な工業生産プロセスです。

そのため、**発電のために投入される工業的に供給されるエネルギー資源の総量に対する製品としての電力の総量の比率＝“エネルギー産出比”**によって、工業生産プロセスとしての優劣を比較することができます。現在の工業化社会を支えている基本エネルギー資源は石油なので、石油換算のエネルギー量として比較するのが合理的です。

ここでは例として石油火力発電に対して検討することになります。次頁に石油火力発電の電力生産図を示します。

<算定の仮定>

- 燃料石油価格 25 円/リットル
- 燃料石油エネルギー量 9Mcal/リットル = 37.8MJ/リットル = 10.5kWh/リットル
- 発電施設建設・運用費用の内のエネルギー費用の割合 20%



石油火力発電の発電原価は 10 円/kWh 程度とします。

石油火力発電の燃料として投入した石油の燃焼熱に対する発電の効率は40%程度なので、電力 1kWh を生産するためには燃料石油を 2.5kWh 消費します。その燃料費は、 $(2.5/10.5) \times 25 \text{ 円} \div 6 \text{ 円}$ になります。残りの 4 円/kWh は発電所の建設費と耐用期間中の運転・維持に投入される費用を総発電量で均等に償却とした場合の費用です。発電所の建設費や運転・維持費の一定割合はエネルギー費用です。ここでは割合を 20%とします。それ以外の 80%は発電所建設や運転・維持に投入する原材料資源の費用＝固定設備費用とします。

以上から、石油火力発電における発電電力量 1kWh 当たりに投入される工業的なエネルギー量の合計は、

$$2.5 + 0.33 = 2.83(\text{kWh})$$

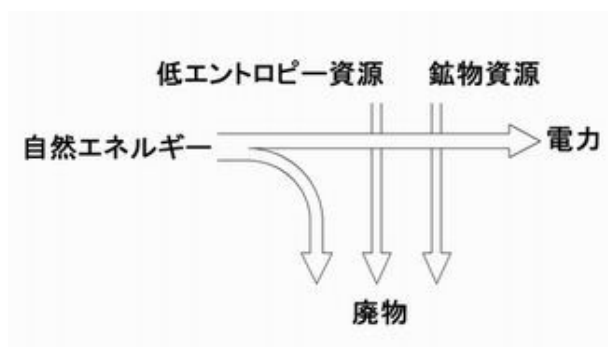
あるいはこれを経済コストで表すと

$$2.83(\text{kWh/kWh}) \times 25 \text{ 円} / 10.5\text{kWh} = 6.73 \text{ 円/kWh}$$

$$\text{エネルギー産出比} = (\text{発電電力量}) \div (\text{投入エネルギー量}) = 1/2.83 = 0.35$$

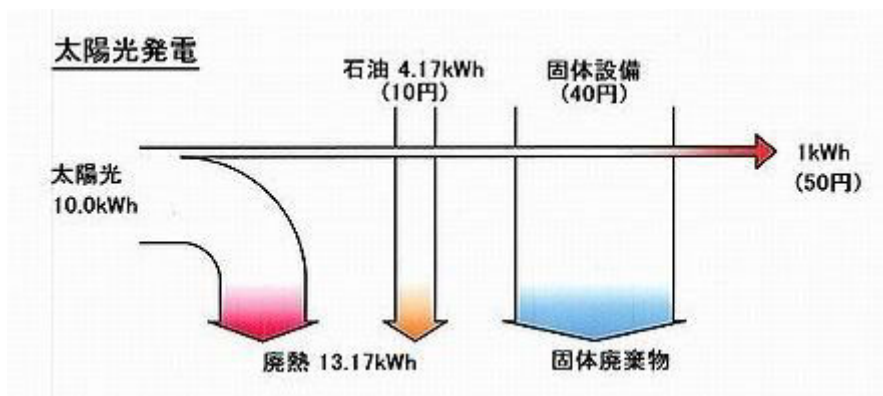
3-3 自然エネルギー発電と発電コスト

現在、原子力発電所事故の影響もあり、代替発電システムとして自然エネルギー発電を導入すべきであるという主張が広がっています。ただし、自然エネルギー発電の唯一の問題はコストが高いことであると言われます。これを科学的に検証することにします。



前頁に自然エネルギー発電の電力生産図を示します。自然エネルギー発電では、電力の原料は環境中に普遍的に存在する“自由財”である自然エネルギーです。工業生産システムとしての優劣を判断するエネルギー産出比を求める場合、自由財＝無価値である自然エネルギー量は投入エネルギー量に算入する必要はありません。

自然エネルギーの例として、太陽光発電の電力生産図を示します。



自然エネルギー発電では電力の原料である自然エネルギーは自由財ですから、発電システムの本質とは工業製品で構成された発電装置の製造・建設ないし運用・維持なのです。

家庭用小規模太陽光発電の場合、標準的な耐用年数を 17 年間程度とした場合の総発電量に対して、発電装置価格を単位発電量あたりに均等割した値を発電原価とすると 50 円/kWh 程度になります。太陽光発電装置はメンテナンスフリーとして、運転・維持経費は無視することにします。

太陽光発電装置は工業製品であり、その価格の 20% は製造段階に投入された工業的なエネルギーの費用とすると、太陽光発電電力 1kWh に対する工業的なエネルギー投入費は 10 円/kWh です。これは、太陽光発電という発電方式は、石油という工業的なエネルギー資源を燃料として発電を行う石油火力発電 (6.73 円/kWh) よりも大量の工業的なエネルギーを必要とすることを示しています。太陽光発電のエネルギー産出比は、

$$1/4.17 = 0.24 < 0.35$$

であり、火力発電よりも低いのです。つまり、同量の石油を石油火力発電と太陽光発電に投入した場合、太陽光発電は石油火力発電の $0.24/0.35 = 0.69$ 倍の電力しか供給できないのです。

水力や地熱を除けば、一般的に自由財である自然エネルギーの持つエネルギー密度は極めて低く、非定常に変動しています。その結果、工業的に利用できるようなエネルギーを得るためには例外なく巨大な発電装置が必要になります。その巨大な発電装置という工業製品を製造し、運用・維持するために莫大な鉱物資源と同時に工業的なエネルギーを消費するのです。その結果、電力の原料として工業的なエネルギーを必要としないにもかかわらず、発電装置の製造・建設・運転・維持に投入する工業的エネルギー量が石油火力発電

を上回るのです。

このように、直接的に発電燃料として石油や石炭などを使用しなくても、発電施設が工業製品である限り、必ず石油を始めとする工業的なエネルギーの消費を伴うのです。このような分析に基づき、槌田敦はあらゆる工業的発電装置は全て間接火力発電であると述べていることは妥当だと考えます。しかも、**太陽光発電の分析でも明らかなように、その間接火力発電の大部分はエネルギー産出比において火力発電以下の低効率な発電装置であるばかりでなく、膨大な鉱物資源を浪費しているのです。**

通常、熱力学におけるエネルギー効率は発電システムに投入される電力の原料となるエネルギー量に対する最終製品である発電電力量ですが、工業生産システムとしての優劣を判断するためにはまったく役に立ちません。あくまでも工業技術としての発電技術の優劣を判断する基準は、発電を行うために投入される工業的なエネルギー量に対する発電電力量なのです。

エネルギー供給技術が高コストであるということはエネルギー産出比が低いことを示しており、発電技術として致命的に劣っていることを示しています。高コストの発電システムの導入は科学的な合理性を欠いた判断なのです。

また、再生可能エネルギーと呼ばれているエネルギー供給技術は、既存の化石燃料によるエネルギー供給技術よりも低効率であり、呼称とは裏腹に、化石燃料に支えられた工業的な生産システムがなければ自らを単純再生産することも不可能であり、化石燃料の代替システムには成り得ません。

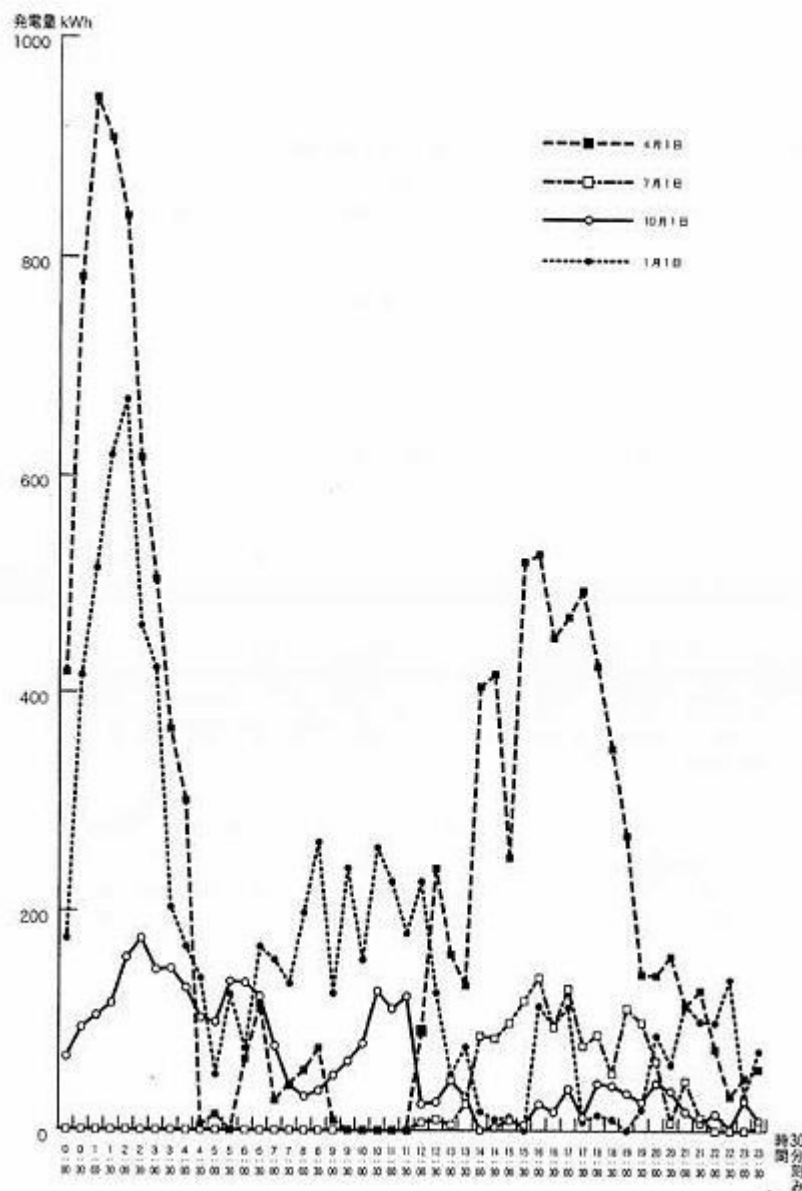
3-4 自然エネルギー発電規模の試算



写真は横浜市のハマウィングという愛称の 2MW 風力発電装置です。この風力発電装置は、総工費 5 億円程度、年間の運転・維持費 5,000 万円程度です。ハブ高さ 78m、ブレード

ド直径 80m、上部工（地上部の構造物）の重量は 250t 程度です。定格出力は 2MW ですが、設備利用率の実績は 12%、平均発電能力は 250kW（＝340PS）程度です。

例えば、340PS（仏馬力）程度といえば、ちょっとしたスポーツカーの出力程度です。また 250kW 出力のディーゼル発電機やガスタービン発電機の重量は 6t 程度です。風力発電装置がいかに巨大な発電装置が必要であるのかが想像できるのではないのでしょうか。そればかりではありません、風力発電電力はあまりにも不安定でそのままではとても使えないのです。ハマウィングの発電実績データを示しておきます。



次に、同じ平均発電能力を得るために必要な太陽光発電装置＝メガ・ソーラーの規模を考えてみます。

250kW 出力の装置が 1 年間稼動した時の総発電量は

$$250\text{kW} \times 24\text{h/日} \times 365 \text{ 日/年} = 2,190,000\text{kWh/年}$$

です。太陽光発電パネルの日本での平均的な運用実績は $100\text{kWh}/\text{年}\cdot\text{m}^2$ 程度ですから、必要な太陽光発電パネルの面積は

$$2,190,000\text{kWh}/\text{年} \div 100\text{kWh}/\text{年}\cdot\text{m}^2 = 21,900\text{m}^2$$

$148\text{m} \times 148\text{m}$ 程度、野球場ほどの広大な面積になります。定格出力 1kW を得るために必要な太陽光発電パネル面積が 10m^2 として、その価格が 100 万円程度とすると、太陽光発電パネル価格は $21,900 \div 10 \times 100$ 万円 $\div 22$ 億円程度になります。

日本の年間の最終エネルギー消費量は $1.6 \times 10^{19}\text{J} = 4.444 \times 10^{12}\text{kWh}$ 程度です。仮にこれをすべて $2,000\text{kW}$ 級の風力発電装置で賄うとした場合、必要な基数は

$$4.444 \times 10^{12}(\text{kWh}/\text{年}) \div 2,190,000(\text{kWh}/\text{基年}) = 2,029,224 \text{ 基}$$

ということになります。 47 都道府県で均等割すると、 $43,175$ 基/県ということになります。太陽光発電ならば $148\text{m} \times 148\text{m}$ のメガ・ソーラー発電所が $43,175$ 箇所/県必要ということになります。あるいは 4.444 万 km^2 、国土面積の 12% に太陽光発電パネルを敷き詰めることになるのです。

しかもこれはエネルギーの絶対量にだけ着目した少なめの見積であり、実際には更に不安定電力の安定化や電力需要に対応するための巨大な蓄電装置やバックアップ用発電施設、広域大容量送電線網などが必要になります。

風力発電や太陽光発電の耐用年数が 20 年とすれば、 1 年あたり $2,159$ 基/県の風力発電装置あるいは $2,159$ 箇所/県のメガ・ソーラー発電所を常に更新し続けることになります。例えばメガ・ソーラー発電所の更新費用は、

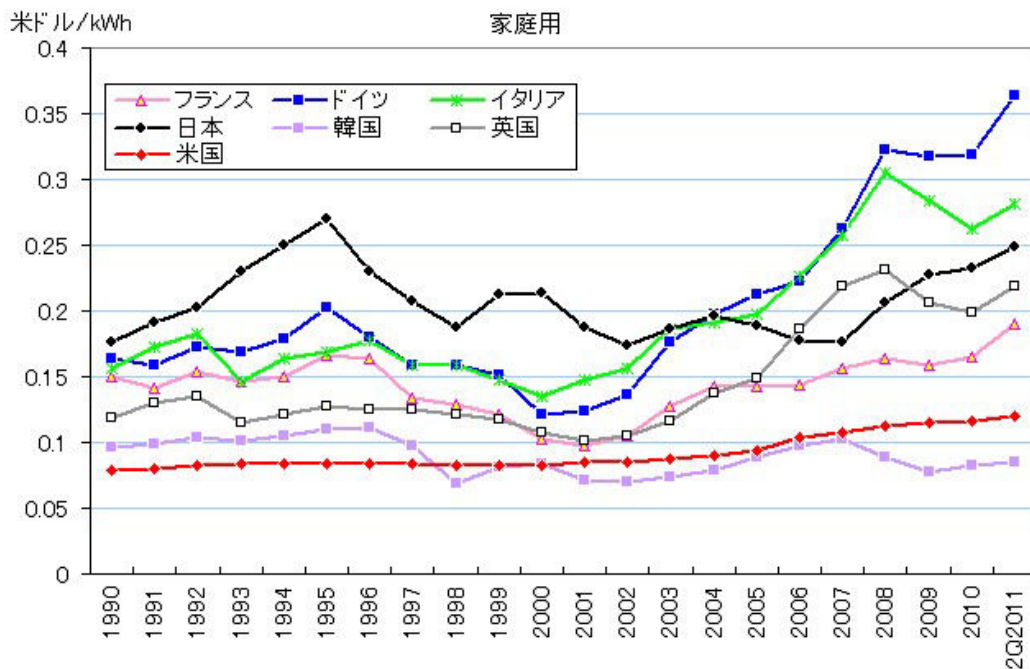
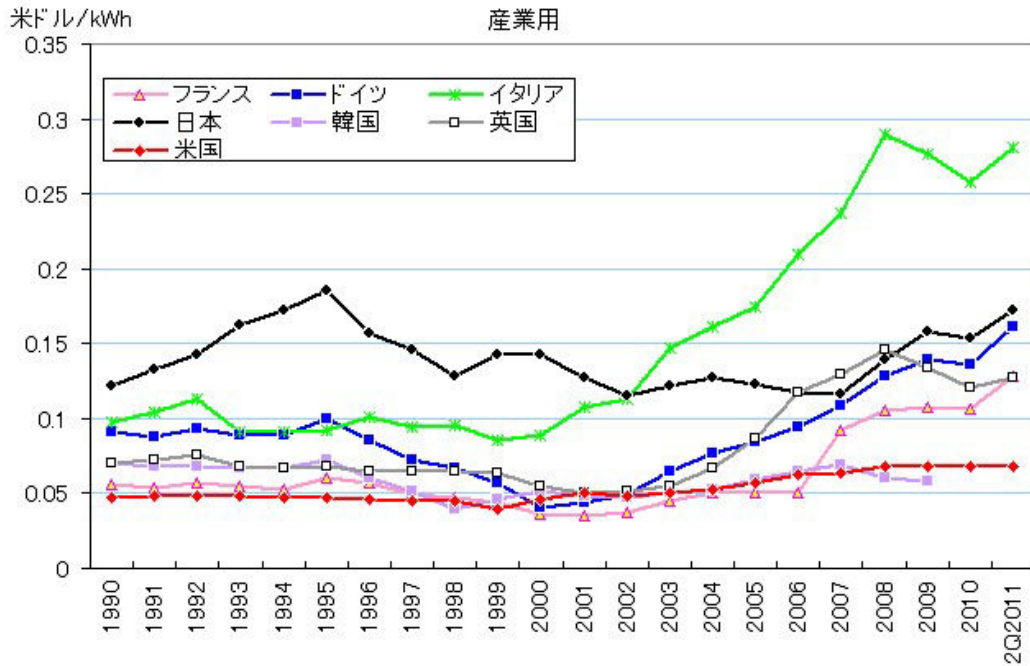
$$22 \text{ 億円/箇所} \times 2,159 \text{ 箇所/県}\cdot\text{年} \times 47 \text{ 県} \div 223 \text{ 兆円/年}$$

これを実現するためには、工業生産設備を飛躍的に拡大しなければとても賄うことはできません。現実的にはこの生産設備の増強と莫大な発電装置生産の経済的な負担だけで現在の日本の国家予算を超えることになり、実現不可能なのです。

3-5 固定価格買取制度の失敗

現在欧州では金融危機が進行中です。その原因の一つが科学的な合理性のない自然エネルギー発電の大規模導入なのです。スペインは言うに及ばず、ドイツでも再生可能エネルギー発電に対する全量高額買取制度＝FIT は既に破綻しました。今年 4 月からは買取価格が大幅に引き下げられ、来年からは全量買取制度は破棄され、部分的な買取制度になります。

電気料金の国際比較



(注) 米国は課税前の価格。2Qは第2四半期。

(資料) OECD/IEA, Energy Prices and Taxes, Volume 1999-1/Volume 2005-1/Volume 2011-1,3,4

ドイツでは、FIT の導入によって個人契約の電気料金は日本をはるかに越えて世界最高額になっています。産業用電力も FIT 導入前の 3 倍程度に高騰し、日本と同程度になっているのです。

科学的な合理性のない再生可能エネルギーの政策的な導入は社会・経済システムまで破壊することになります。

補足)太陽電池パネルの発電効率の限界

太陽光発電パネルの発電効率の改善について、これまで色々と提案が行われ、その都度バラ色の未来像が語られました。洞爺湖サミット前には政府主導の技術開発で太陽光発電の発電効率を 3～4 倍にするなどという愚かな目標が立てられました。ここでは熱学的に太陽光発電技術の限界を推定することにします。

太陽電池パネルの太陽放射から電気への変換効率は、標準条件（放射強度 $1,000\text{W/m}^2$ 、太陽電池パネル温度 25°C 、エア・マス 1.5）の下で現在 20%程度を実現しています。物体は表面の温度状態によって電磁波を放射します。標準条件の表面温度 $25^\circ\text{C}=298\text{K}$ の物体は赤外線を放射します。その赤外線放射はステファン・ボルツマンの法則から近似的に次のように推定できます。

$$\sigma T^4 = 5.67 \times 10^{-8} \times 298^4 = 447\text{W/m}^2$$

$1,000\text{W/m}^2$ の太陽放射を受ける 25°C の太陽電池パネルの発電効率 η の上限は、エネルギー保存則から次のように算定されます。

$$\eta = (1,000\text{W/m}^2 - 447\text{W/m}^2) \div 1,000\text{W/m}^2 = 55.3\%$$

現在の実用的な太陽光発電パネルの屋外での発電実績における発電効率は10%程度ですから、これを 3～4 倍にできる可能性があるように見えます。しかし実際の屋外環境では、太陽放射強度 $1,000\text{W/m}^2$ とは夏場の真昼の太陽光に相当します。このような炎天下に物を放置すると非常に高温になり、太陽電池パネルの表面温度は $60\sim 65^\circ\text{C}$ にも達します。 $T=65^\circ\text{C}=338\text{K}$ の場合の太陽電池パネル表面からの赤外線放射は次のように算定されます。

$$5.67 \times 10^{-8} \times 338^4 = 740\text{W/m}^2$$

さらに、大気にさらされた太陽電池パネルの表面は細かい塵などに覆われるため、太陽放射の有効な入射量は 10%程度低減します。これらを考慮すると、屋外における最大発電能力は次のように推定されます。

$$1,000\text{W/m}^2 \times (1.0 - 0.1) - 740\text{W/m}^2 = 160\text{W/m}^2$$

屋外環境における発電効率の理論的な上限は 16%程度ということになります。つまり、実用上太陽電池パネルの発電効率は既にほとんど限界に達しているのです。これが、西欧諸国が太陽電池パネルに関する技術開発を断念した理由なのです。その結果、電力価格、人件費の安いアジア産の太陽電池パネルにもはや対抗する術がなかったのです。