

■ 人為的 CO₂ 地球温暖化

1. 二酸化炭素地球温暖化仮説の 3 要素

1-1 完新世の気温変動の概要

地球温暖化とは、狭義には 20 世紀終盤から 21 世紀初頭にかけて継続している気温の上昇傾向を指しています。しかし、歴史的あるいは長期的に見れば数十年間規模の気温の上昇などさほど珍しい事象ではありません。

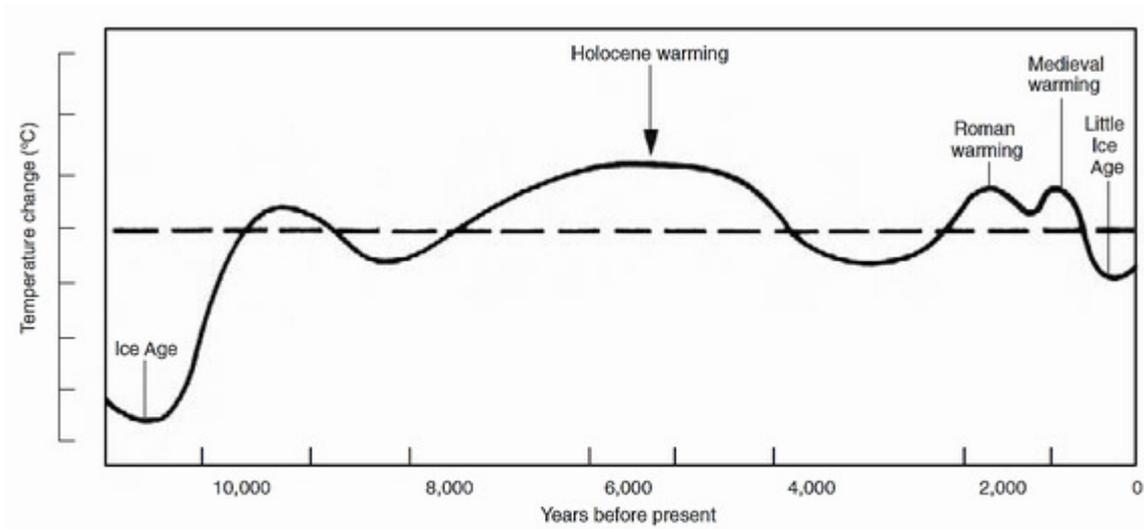


Figure 6
GLOBAL TEMPERATURE VARIATIONS FOR LAST 10,000 YEARS

The dotted line represents temperature near the beginning of the 20th Century. In its 2001 and 2007 reports, the IPCC ignored the earlier parts of this curve, presenting only the modern warming.

Source: IPCC 1990

上図は現在の間氷期(完新世)の気温変動を示したものです。現在は図の右端です。歴史的によく知られている古代の 4 大文明や日本の縄文時代は 6000 年前を中心として数 1000 年間という長期間にわたる高温期が続いた時代に栄えました。

また、直近では約 1000 年ほど前に中世文明が栄え、日本でも平安文化が開花した中世温暖期という 100 年オーダーの温暖期がありました。

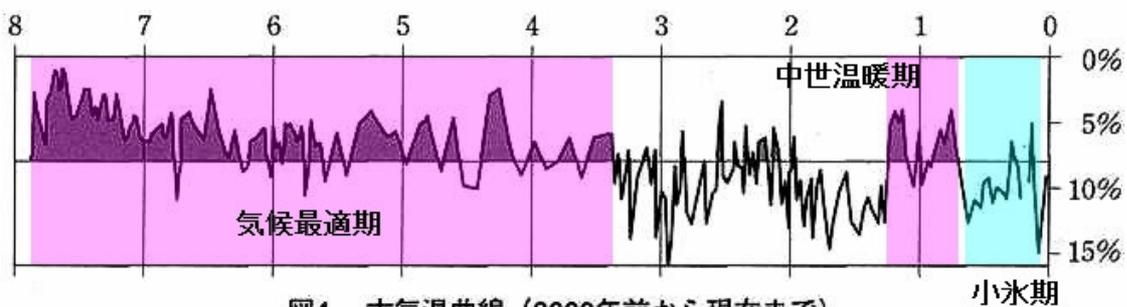


図4 古気温曲線 (8000年前から現在まで)

尾瀬ヶ原ハイマツ花粉の百分率 (8%基準線に対し、±3度に相当)
坂口豊 (専修人文論集51巻pp.79-113, 1993) より

上図は尾瀬ヶ原のハイマツの花粉量という生物指標をもとに復元された日本の気温変動です。右端が現在です。6000 年前を中心とする長期間の温暖期や 1000 年ほど前の中世温暖期の存在が明らかです。その中でもかなり短いサイクルで気温の温暖期と寒冷期が繰り返し現れていることがわかります。

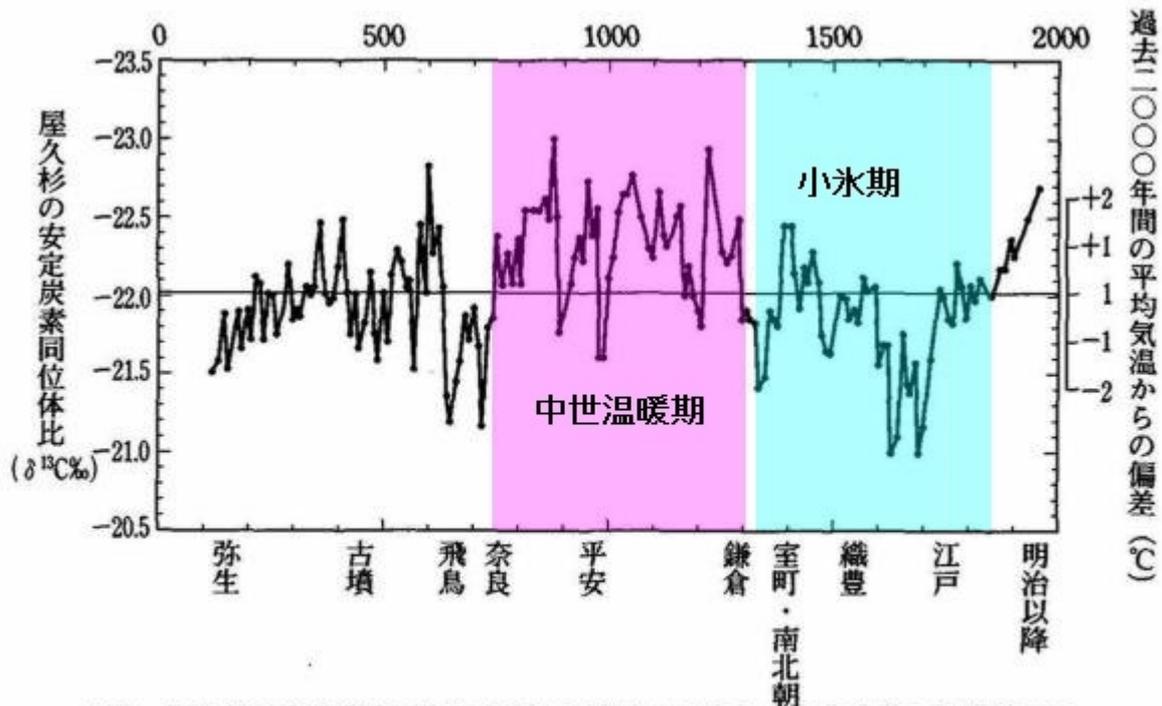


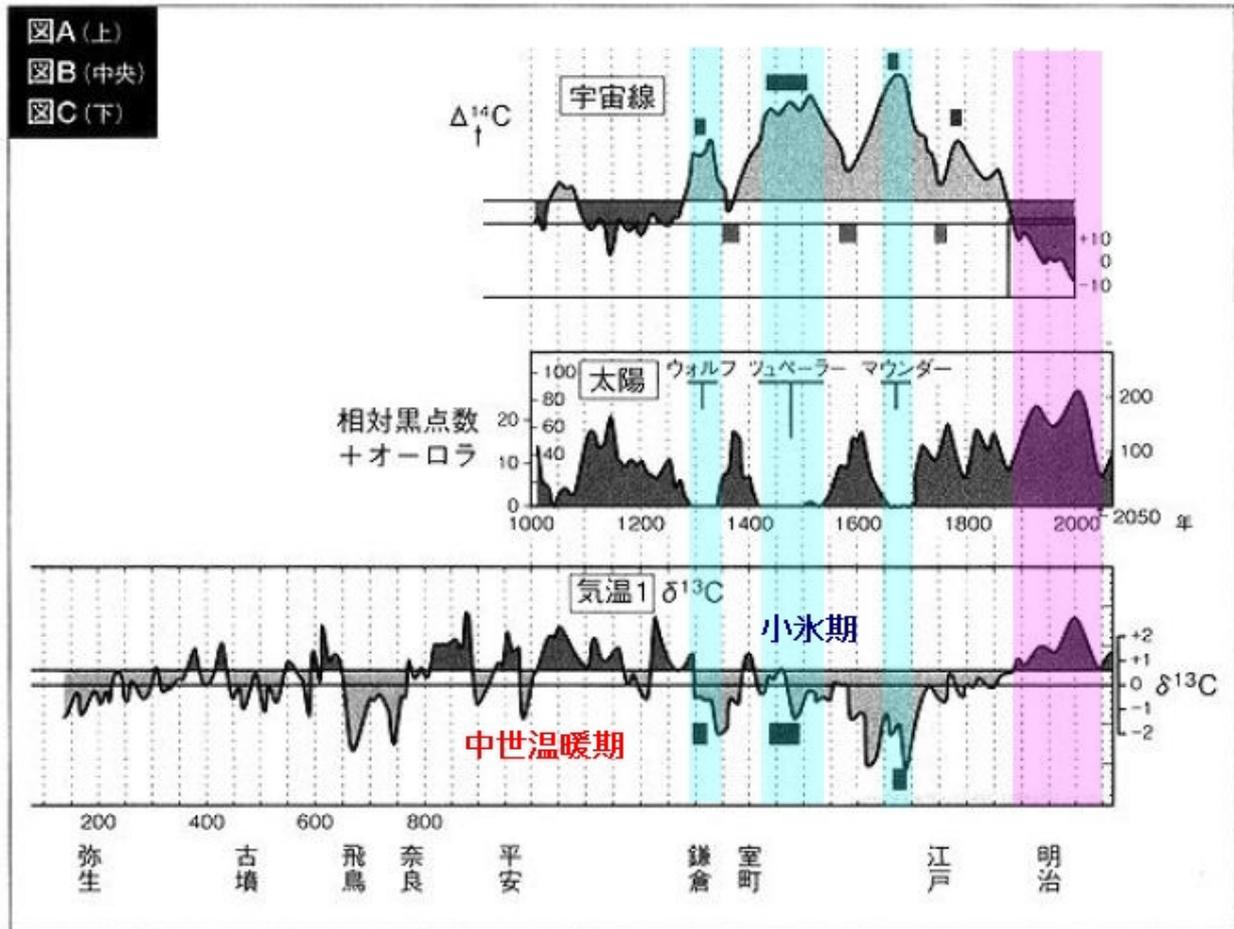
図5 屋久杉の安定炭素同位体分析から明らかにされた歴史時代の気候復元図

北川 (吉野ほか編『講座・文明と環境 第6巻 歴史と気候』 p.50) より

上図は屋久杉に含まれる安定炭素同位体 ^{13}C の分析から日本付近の気温変動を再現した図です。これを見ると、直近では江戸時代の寒冷な時期から気温の上昇傾向が継続しています。

1-2 気温変動と太陽活動

このように歴史的に見ると、完新世に入ってからに限定しても、地球の平均的な気温が数°Cの幅で上下することは珍しいことではないことがわかります。この歴史的な気温変動に太陽活動が深く関わっていることがわかっています。



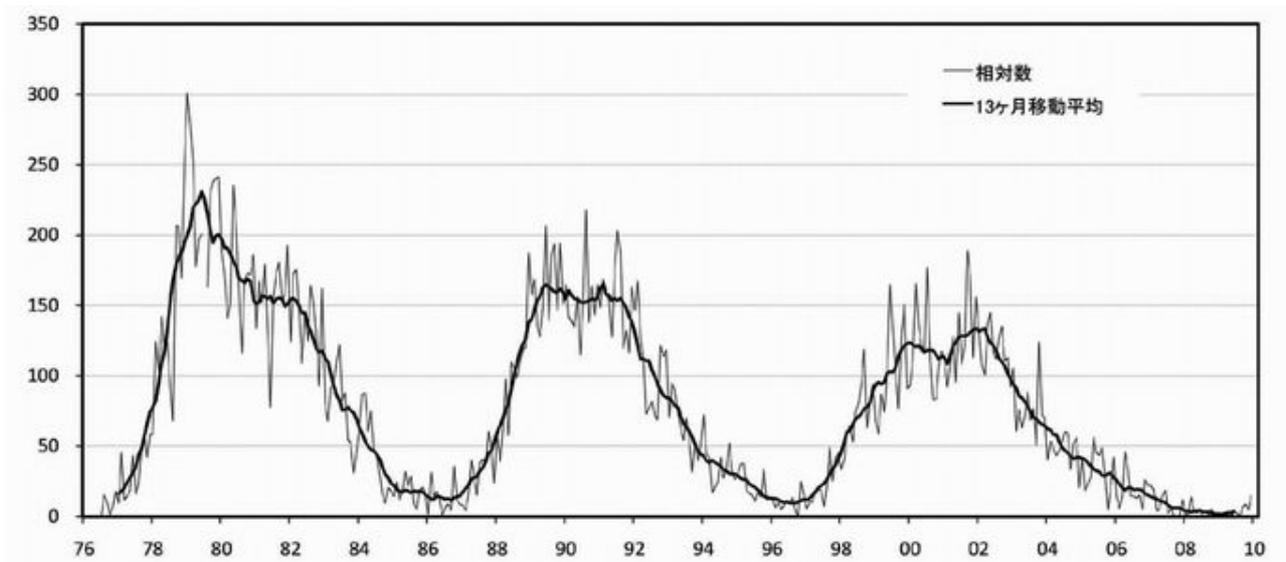
A: 宇宙線照射量 (Stuiver and Braziunas, 1988)、B: 太陽の活動度 (Eddy, 1988)、C: 炭素同位体から推定した気温変化 (名古屋大学・北川浩之准教授のデータより)

上図に示す黒点相対数は太陽活動の活発さの指標です。ウォルフ、シュペーラー、マウンダー極小期はほとんど太陽黒点が消失してしまい太陽活動が不活発であった時期です。太陽活動の活発な時期には太陽風が強まり、逆に地球に届く宇宙線量が減少します。宇宙線(中性子線)は窒素 ^{14}N から陽子を叩きだして ^{14}C に核変換します。その結果、木の年輪に含まれる ^{14}C の精密分析によって宇宙線量の変化が推定できます。太陽活動の活発さと ^{14}C 量は逆相関関係になります。

地球の気温は太陽活動の消長によって変化してきたのです。太陽活動が活発な時期には地球の気温は高く、不活発になると気温は低くなるのです。定性的には太陽活動の影響で地球の大域的な気温変動は説明できます。

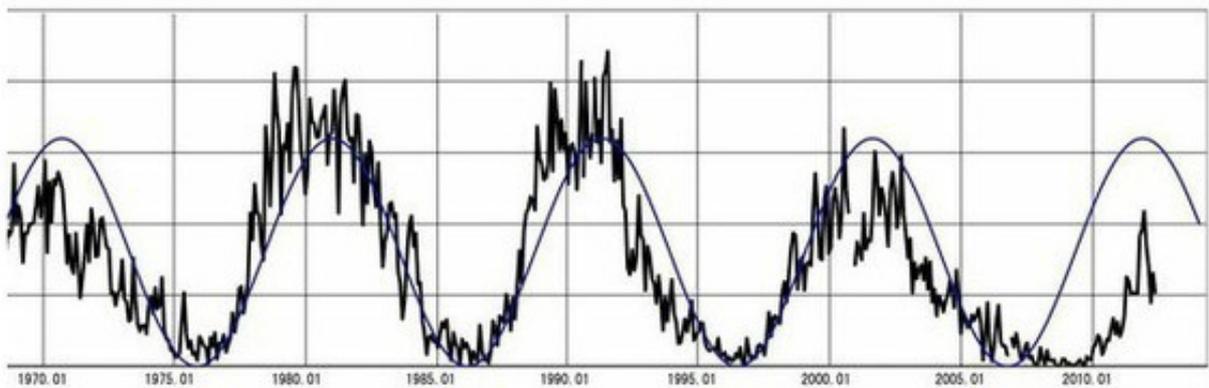
上図から、産業革命から前世紀終盤の太陽活動の活性度は中世温暖期を凌ぐ高いレベルにあったことがわかります。この期間、継続して気温の上昇傾向が続いたことは自然現象として当然です。

今世紀に入って、太陽活動は次第に不活発になってきており、太陽黒点の周期が大きく乱れてきています。それに呼応するように世界の平均気温の上昇傾向も頭打ちになってきています。

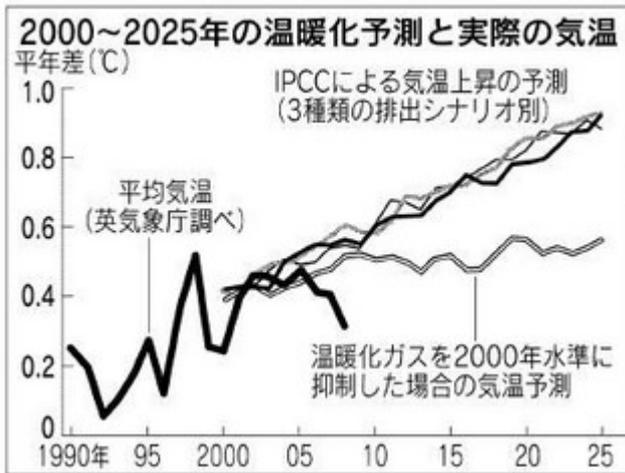


太陽黒点の極大値の現れる周期は概ね 11 年であり、この周期が短い時には太陽活動が活発であり、長い時には不活発です。本来ならば、2011 年から 2012 年に現れるべき極大値が明確には現れていません。

< 近年約50年の太陽活動。 >



上図は 11 年周期に対するズレを示したものです。1980 年～1990 年では極大値の現れる期間が 11 年より短く、この時期の太陽活動は活発であったようですが、その後次第に太陽活動が低下傾向を見せ始めています。今季の太陽黒点数の極大値の出現は大幅に遅れているようです。



21 世紀に入ると、温暖化傾向は頭打ちになり、次第に気温は低下傾向を示し始めてるように見えます。地球物理学の丸山茂徳氏や太陽物理学の桜井邦朋氏らは寒冷化の始まりの可能性に言及しています。

下図に太陽の黒点周期の変動(左側の軸)と北半球の 1951-1980 年の平均気温からの気温偏差の変動を示します。黒点周期が短い時期ほど高温であることがわかります。

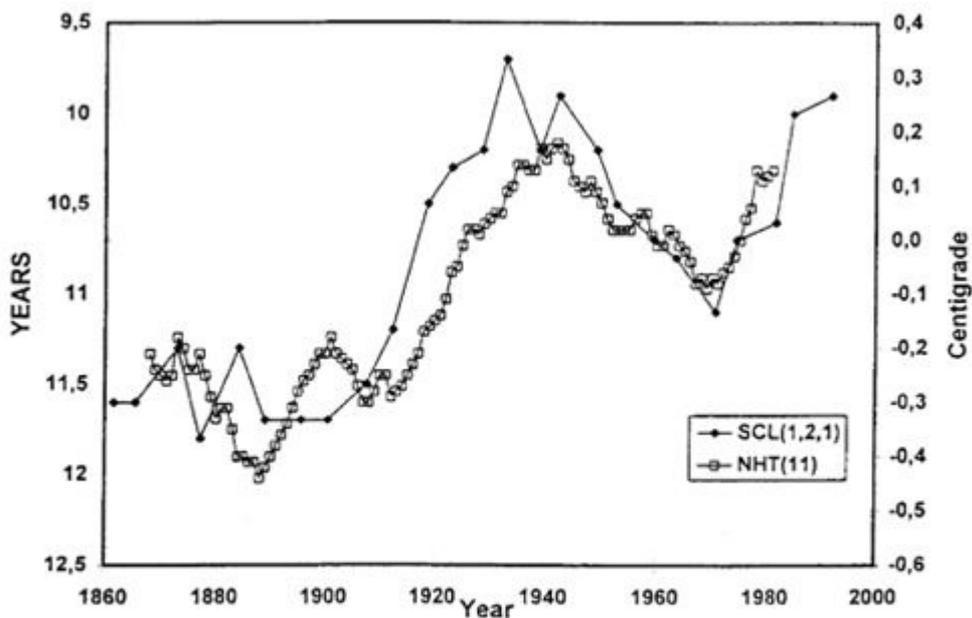
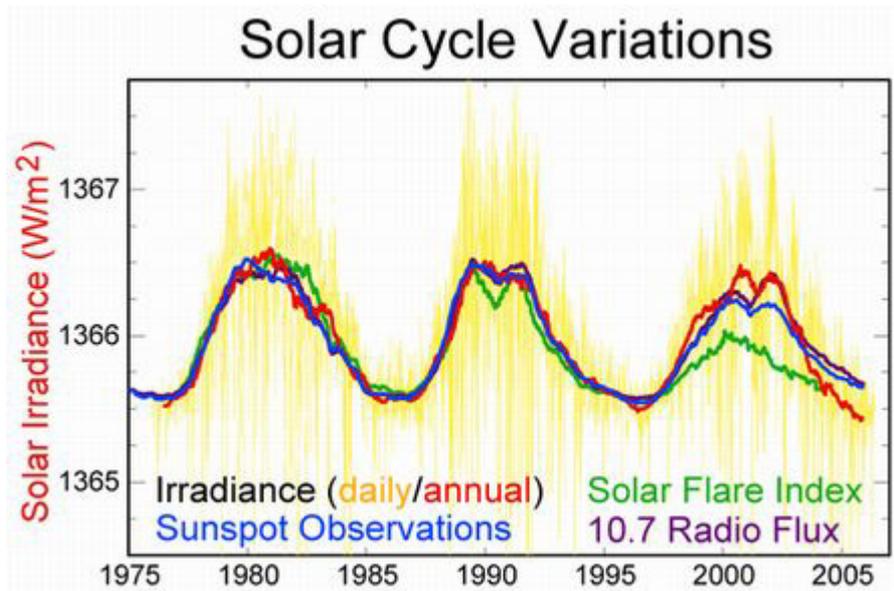


Fig. 4 Eleven-year running mean of the annual average northern hemisphere land air temperature relative to the average temperature 1951-1980, and the (1-2-1)-filtered length of the sunspot cycle

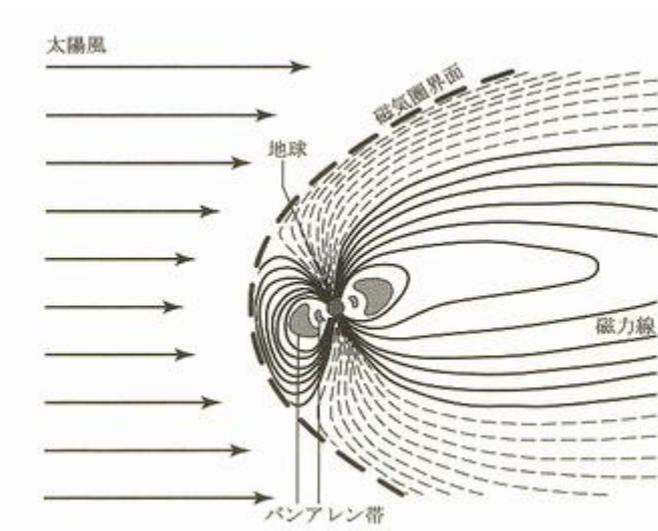
地球の気温の変動傾向に対して、太陽活動が深く関与していることは古気候学では定説ですが、現在言われている前世紀終盤からの気温の上昇傾向に対する解釈はこれを無視した極めて不自然なものです。

地球温暖化の人為的な原因を主張するのはコンピューター気象研究者達です。彼らは、定性的に太陽活動の消長と地球の気温変動がよく同期する事実を知っています。しかし、彼らのシミュレーションモデルでは太陽活動の消長を地球に到達する太陽放射の強さという一面的なデータでしか評価していません。



上図は、地球の位置で太陽放射に直交する面が受ける太陽放射の強さ、いわゆる太陽定数の経年変化を示したものです(→太陽放射と地球放射)。太陽定数は 1366W/m^2 程度を中心に、最大振幅は 1W/m^2 程度、比率にして 0.1% 程度です。彼らは太陽放射強度の変動はほとんど無視しても問題無い＝太陽活動と地球の気温変動には関係はないと考えたのです。

しかし、既に示したように太陽活動の消長と地球の気温変動は極めて高い相関関係を示しているのですから、放射強度以外の要因を検討すべきでしたが、彼らはそれを怠ったのです。



これに対して宇宙線量の変動に着目したのがデンマーク気象研究所のスベンスマルクです。太陽活動の消長によって太陽～地球系の磁場が変動し、地球大気に降り注ぐ宇宙線量が変化します。太陽活動が活発になり太陽風が強まると地球磁場はそれに押されて強固になるため、宇宙線の侵入が困難になります。

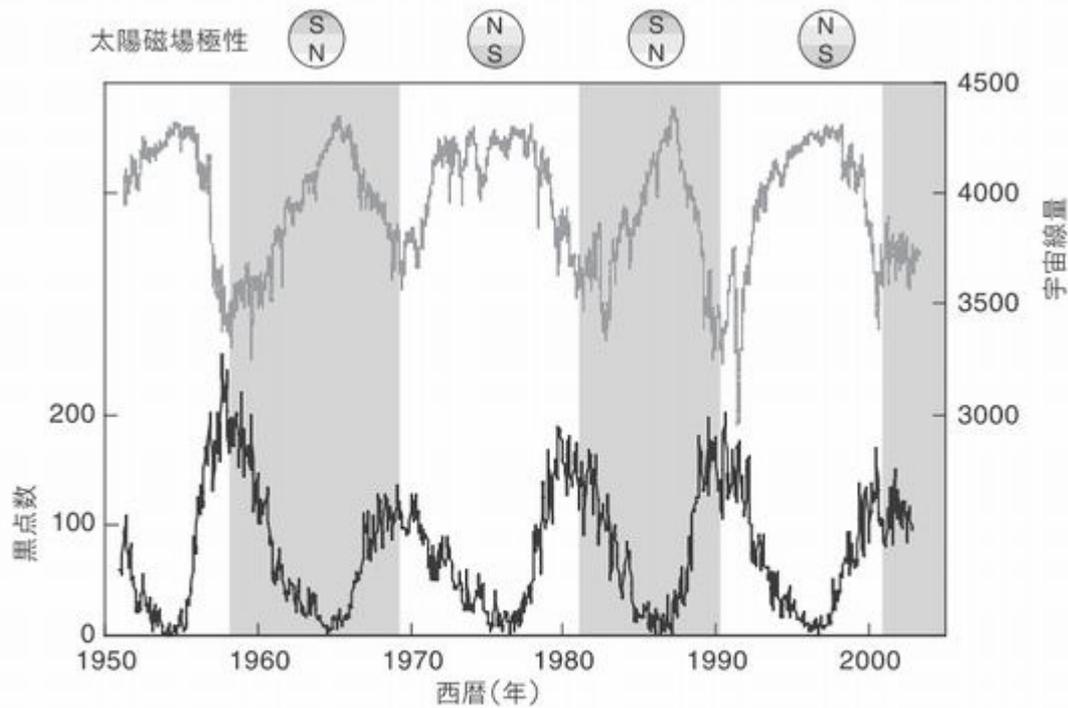


図2——黒点数(黒)および宇宙線量(灰)の変動. 影をつけた時期は太陽磁場の極性が負の時期に対応する. 宇宙線量は, 極性が負のときは鋭いピークをもつが, 極性が正のときは, 比較的なだらかなピークを示す.

その結果、既に示した通り太陽活動の活性度(太陽黒点数)と大気に到達する宇宙線量には逆相関関係になります。太陽活動が弱くなることによって宇宙線量は増大します。

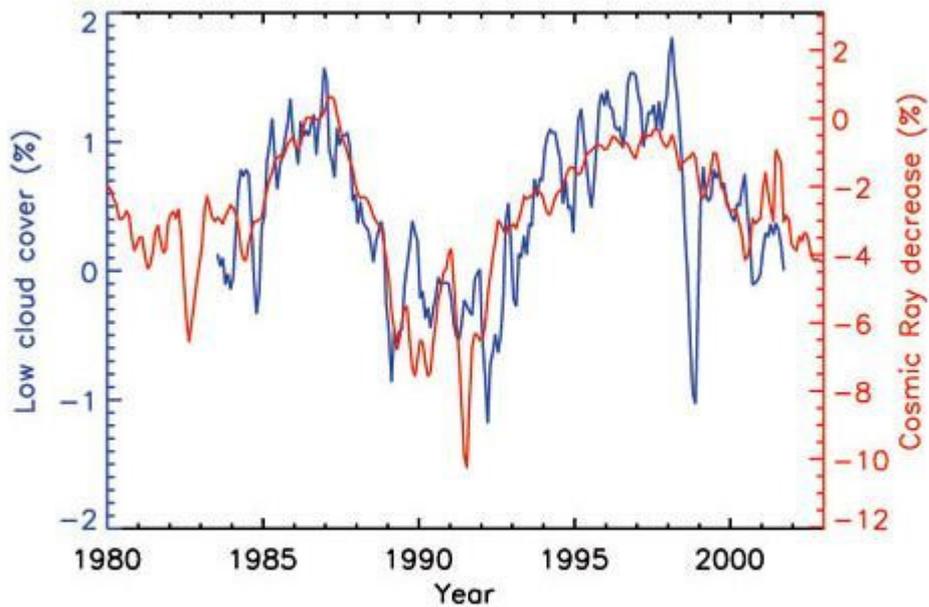


Figure 3: The correlation between cosmic ray flux (orange) as measured in Neutron count monitors in low magnetic latitudes, and the low altitude cloud cover (blue) using ISCCP satellite data set, following Marsh & Svensmark, 2003.

ウィルソンの霧箱実験でわかるように、湿った空気に荷電粒子を放射するとその光跡上に水が凝結します。同様に宇宙線の増加が地球の雲量の増加を引き起こすというのがスベンスマルク効果と呼ばれる仮説です(1997年)。つまり、太陽活動が低下することによって太陽放射強度が低下するだけでなく、地球の雲量が増加することで地球を温める有効太陽放射の到達量が減少するために地球の気温が低下するという仮説です。雲量が1%増加すると地球の平均気温は1℃低下するとも言われています。

スベンスマルク効果も今のところ仮説ですが、太陽活動と地球の気温変動の関係について、放射強度以外の要因があることを示唆する重要な指摘です。

1-3 人為的 CO₂ 地球温暖化仮説登場の背景と3構成要素

現在、説明なしに温暖化と言う場合、産業革命以後、あるいはもっと狭くは前世紀終盤からの気温の上昇傾向を指し、しかもその原因は人間の経済活動であるとするものです。

既に述べてきたように、マウンダー極小期を含む寒冷な時代＝小氷期から太陽活動が次第に活発になることで次第に地球の平均気温が回復してきているという要因を定量的に説明しなくては、仮に人間の経済活動の影響があったとしてもその影響を説明することはできません。

現在まで、人為的 CO₂ 地球温暖化仮説を直接説明できるような気象観測データは存在しません。あるのは、CO₂ 地球温暖化仮説が正しいことを前提としたコンピュータプログラムを使った数値シミュレーションという仮想空間の中にある仮想現実の計算結果だけなのです。

当初から人為的 CO₂ 地球温暖化仮説は欠陥だらけの仮説に過ぎませんでしたが、これを経済的、政治的に利用したいという人々や、研究費を得たい研究者の思惑によって瞬く間に温暖化仮説の世界標準になりました。

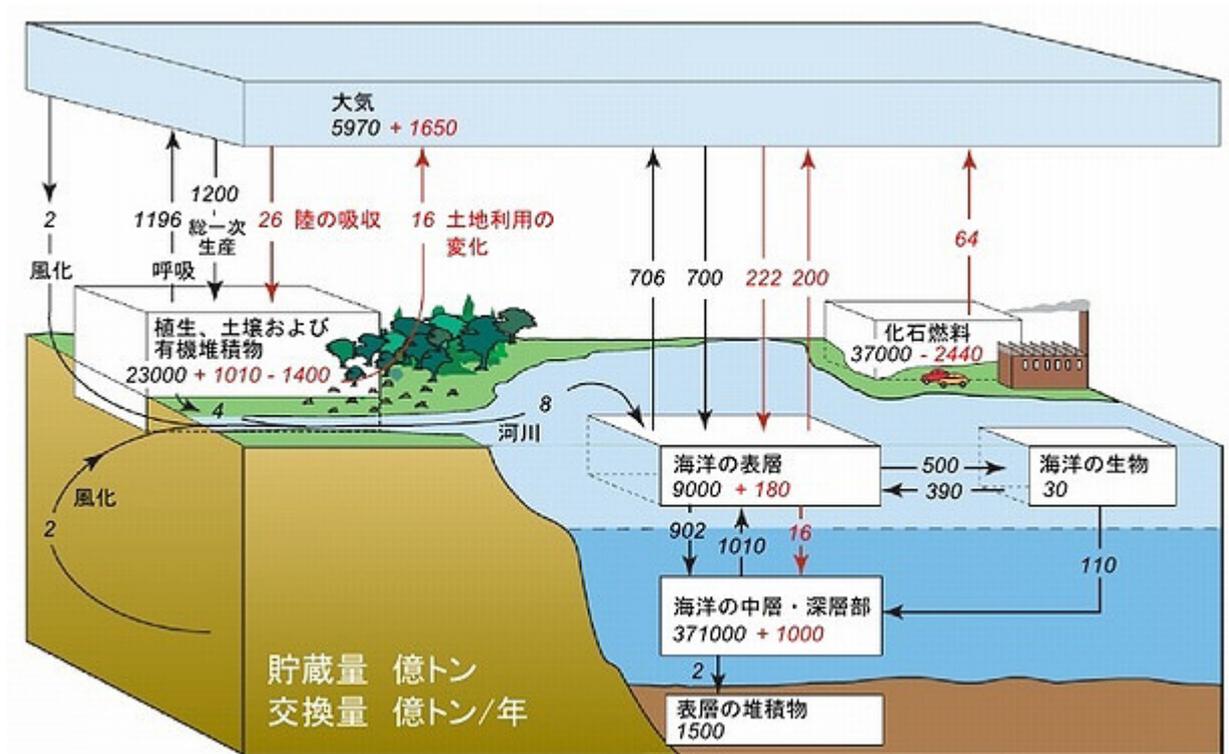
現在、地球温暖化あるいは単に温暖化と言われている仮説は、正確には「①産業革命以降に人為的な化石燃料の消費によって大気中の二酸化炭素濃度が増加したこと」で「②地球大気の温室効果が増大したことによる地球温暖化」が起こり「③生態系に脅威的な悪影響を及ぼす」というものです。私はこれを“人為的 CO₂ 地球温暖化脅威説”と呼ぶことにしています。3つの仮説について、詳細を検討することになります。

2. 大気中 CO₂ 濃度の上昇は自然現象

2-1 大気中 CO₂ 濃度の構造

2-1-1 炭素循環の概要

IPCC2007年報告から、地球表面環境の炭素循環の概要を次の図に示します。矢印の数値は1年間の炭素移動量(億トン/年)を示し、四角で囲われた数値は存在量(億トン)を示しています。また、赤で示した数値は産業革命以降の変化量です。



上図の数値をを整理すると、地表環境から大気中へ放出される二酸化炭素の移動量 q_{in} は炭素換算重量で次の通りです。

$$q_{in} = 1196 + 16 + 706 + 200 + 64 = 2182 \text{ (億トン/年)} = 218.2 \text{ (Gt/年)} \quad \text{※Gt:ギガトン} = 10^9 \text{t}$$

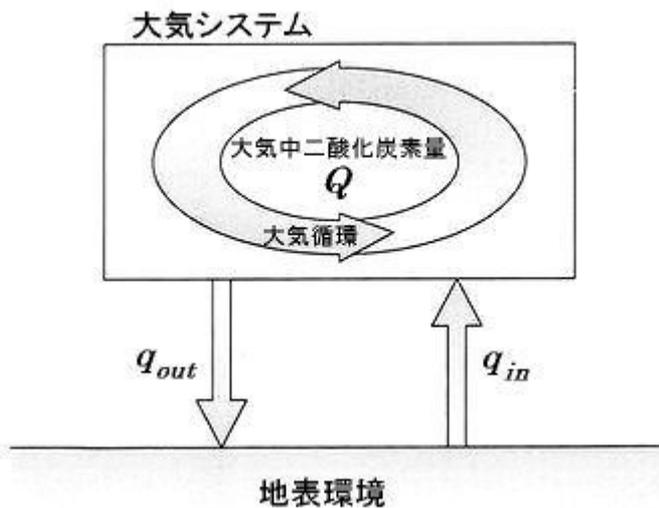
同様に、大気中から地表環境に吸収される二酸化炭素の移動量 q_{out} は炭素換算重量で次の通りです。

$$q_{out} = 2 + 1200 + 26 + 700 + 222 = 2150 \text{ (億トン/年)} = 215.0 \text{ (Gt/年)}$$

また、大気中に存在する二酸化炭素の炭素換算重量 Q は次の通りです。

$$Q = 5970 + 1650 = 7620 \text{ (億トン)} = 762.0 \text{ (Gt)}$$

2-1-2 炭素循環モデル



地表環境の炭素循環モデルを上図に示します。大気システムに対して、1年間に q_{in} だけ二酸化炭素が供給され、同時に q_{out} だけ地表環境に吸収されます。つまり、1年間に大気中に存在する二酸化炭素量 Q の内 q_{out} が交換されることになります。

q_{out} を現象的に考えると、大気中に存在する CO_2 に対する地表環境の吸収反応速度に対応します。

大気中の CO_2 に対する吸収反応速度 v は速度定数 k と反応物濃度 $[CO_2]$ を用いると次のように表すことができます(→反応速度と化学平衡)。

$$v = k \cdot [CO_2]$$

地表環境の CO_2 吸収速度 q_{in} は反応速度 v に比例し、大気中の CO_2 量 Q は CO_2 濃度 $[CO_2]$ に比例するので C_1 、 C_2 を定数として次の式で表すことができます。

$$v = C_1 \cdot q_{out} \quad , \quad [CO_2] = C_2 \cdot Q$$

以上から、

$$k = \frac{v}{[CO_2]} = \frac{C_1 q_{out}}{C_2 Q} \quad \therefore \frac{q_{out}}{Q} = \frac{C_2 k}{C_1} \equiv r$$

r は(1/年)の単位を持ちます。 r は Q に対する1年あたりの吸収率を表します。

このモデルを用いて二酸化炭素量の経年変化を表すことにします。大気中二酸化炭素量の初年度期首の値を Q_0 とします。ここに初年度分の二酸化炭素供給 q_{in} が加わります。つまり、期首における大気中の二酸化炭素量は

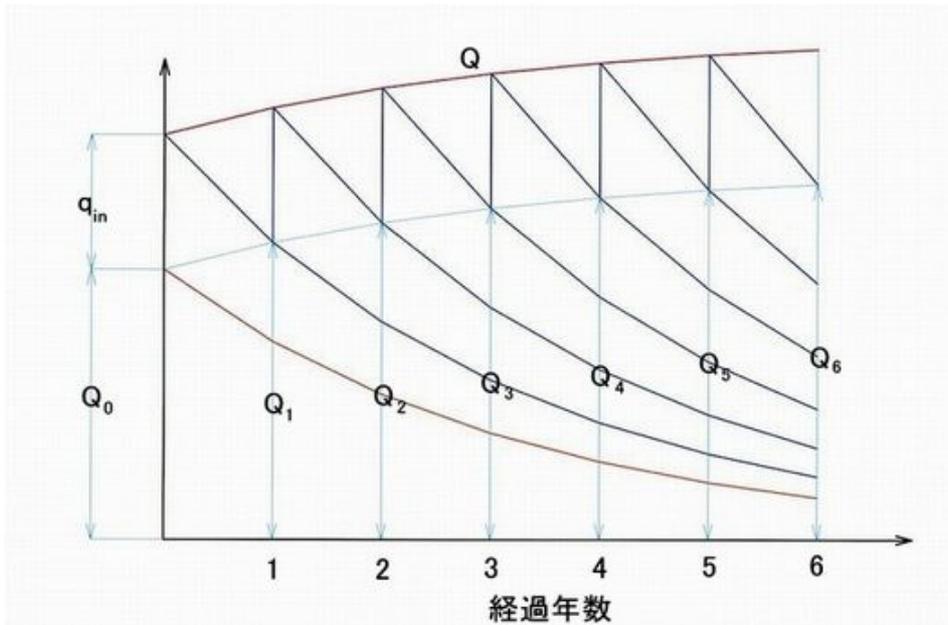
$$Q = Q_0 + q_{in}$$

期末には $q_{out} = Q \cdot r$ だけ減少するので

$$Q = Q_1 = (Q_0 + q_{in})(1-r) = Q_0(1-r) + q_{in}(1-r)$$

同様に、二年度期末では

$$Q_2 = Q_0(1-r)^2 + q_{in}(1-r)^2 + q_{in}(1-r)$$



n 年度期末では次の通りです。

$$Q_n = Q_0(1-r)^n + q_{in}(1-r)^n + q_{in}(1-r)^{n-1} + \dots + q_{in}(1-r)$$

$(n+1)$ 年度期首では q_{in} を加えて次のようになります。

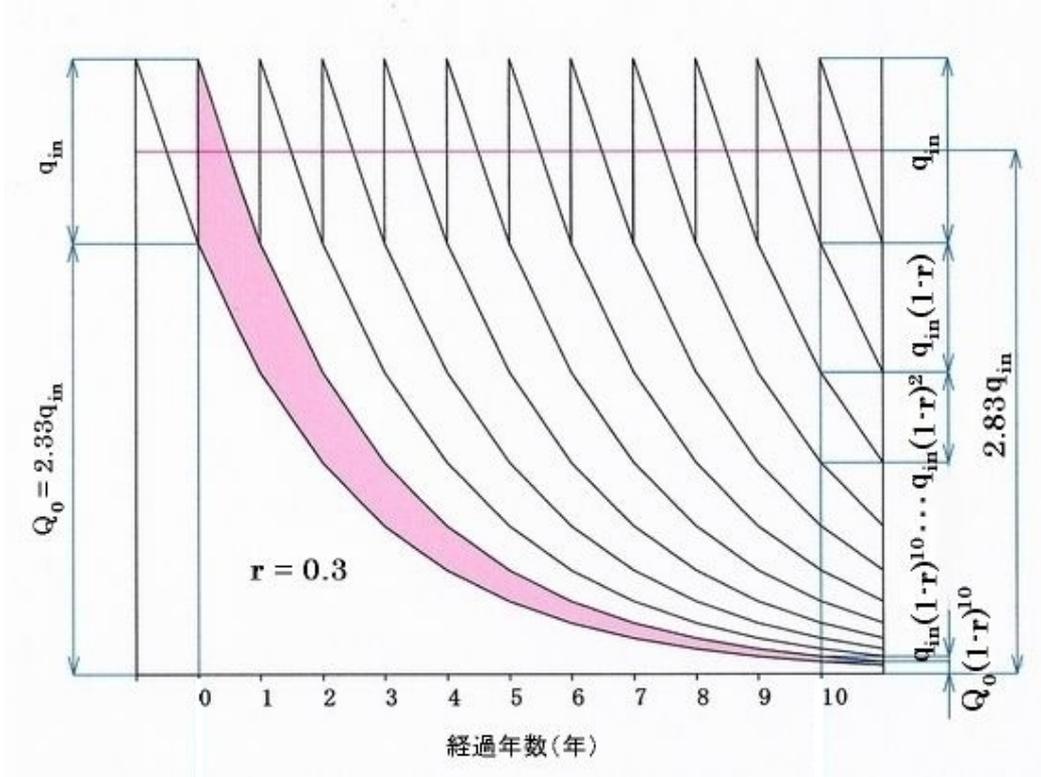
$$Q = Q_n + q_{in} = Q_0(1-r)^n + \frac{q_{in}\{1-(1-r)^{n+1}\}}{1-(1-r)} = \frac{q_{in}}{r} + \left\{ Q_0 + \left(1 - \frac{1}{r}\right)q_{in} \right\} (1-r)^n$$

この値は一定値に収束します。

$$n \rightarrow \infty \quad \text{の時、定常解は} \quad Q = \frac{q_{in}}{r}$$

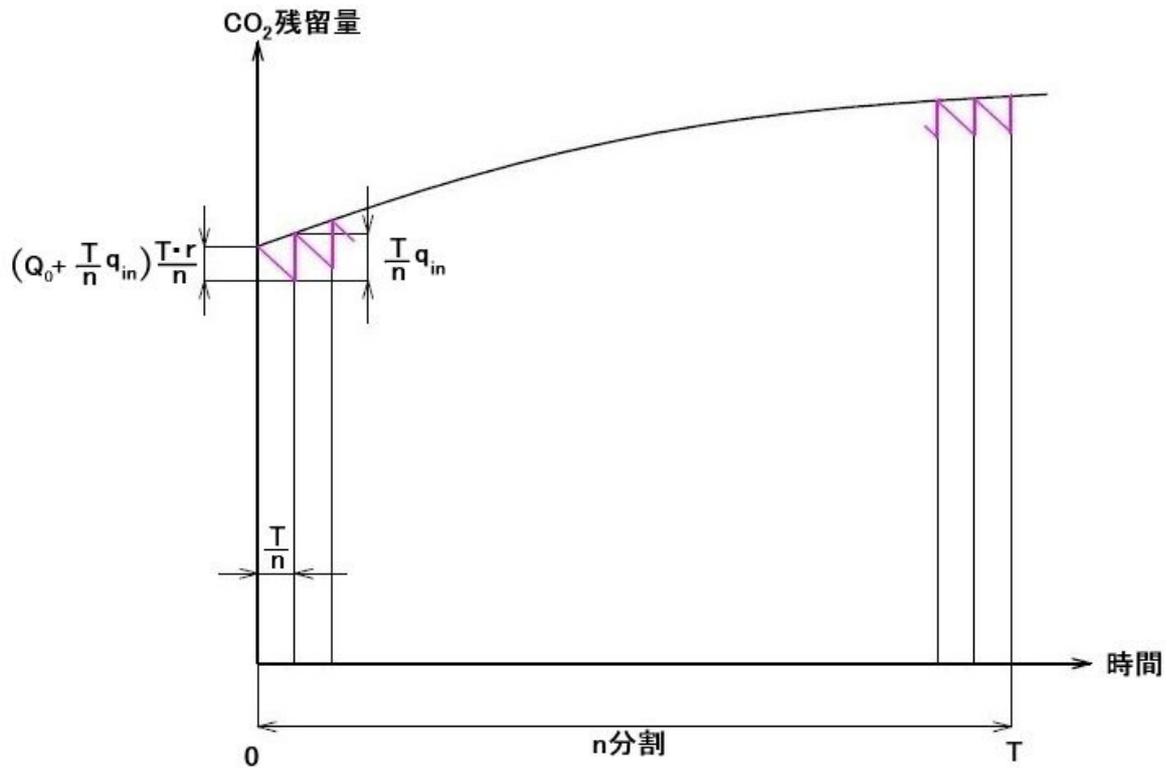
つまり、大気中の二酸化炭素量は年間の供給量 q_{in} と地表環境の年吸収率 r によって決まるのです。大気中の二酸化炭素は、平均的に見ると $1/r$ 年で入れ替わることになります。 $1/r$ 年を平均滞留時間と呼びます。これが離散的な表現による二酸化炭素循環モデルを表す式です。

例えば、 $r=0.3$ とした場合の定常状態における循環モデルの振る舞いを次図に示しておきます。



現在大気中に存在する二酸化炭素の内、10年後の残留量はわずかに $(1-0.3)^{10}=0.028=2.8\%$ に過ぎないので。

以上のモデルでは離散化する期間を1年単位としました。ここではこれを少しだけ変更することにします。対象とする期間 T 年間に n 期に分割することにします。



1年間あたりの地表環境からの CO₂ 放出量 q_{in} と、1年間あたりの地表環境の CO₂ 吸収率 r を使って、1期あたり(=T/n 年あたり)の CO₂ 放出量と吸収率を次のように表すことができます。

- 1期あたりの地表環境からの CO₂ 放出量:(T/n) q_{in}
- 1期あたりの地表環境の CO₂ 吸収率:(T/n) r

第一期の期末における大気中の CO₂ の残留量は次のように表すことができます。

$$Q_1 = \left(Q_0 + \frac{T}{n} q_{in} \right) \left(1 - \frac{T \cdot r}{n} \right) = Q_0 \left(1 - \frac{T \cdot r}{n} \right) + \frac{T}{n} q_{in} \left(1 - \frac{T \cdot r}{n} \right)$$

同様に、第 n 期末における大気中の CO₂ の残留量は次のように表すことができます。

$$\begin{aligned} Q_n &= Q_0 \left(1 - \frac{T \cdot r}{n} \right)^n + \frac{T}{n} q_{in} \left\{ \left(1 - \frac{T \cdot r}{n} \right)^n + \left(1 - \frac{T \cdot r}{n} \right)^{n-1} + \dots + \left(1 - \frac{T \cdot r}{n} \right) \right\} \\ &= Q_0 \left(1 - \frac{T \cdot r}{n} \right)^n + \frac{T}{n} q_{in} \left(1 - \frac{T \cdot r}{n} \right) \left\{ \left(1 - \frac{T \cdot r}{n} \right)^{n-1} + \left(1 - \frac{T \cdot r}{n} \right)^{n-2} + \dots + 1 \right\} \\ &= Q_0 \left(1 - \frac{T \cdot r}{n} \right)^n + \frac{T}{n} q_{in} \left(1 - \frac{T \cdot r}{n} \right) \left\{ \frac{1 - \left(1 - \frac{T \cdot r}{n} \right)^n}{1 - \left(1 - \frac{T \cdot r}{n} \right)} \right\} \\ &= Q_0 \left(1 - \frac{T \cdot r}{n} \right)^n + \frac{q_{in}}{r} \left(1 - \frac{T \cdot r}{n} \right) \left\{ 1 - \left(1 - \frac{T \cdot r}{n} \right)^n \right\} \end{aligned}$$

ここで、分割数 n を無限に細かくした場合の極限を求めることにします。ネイピア数の定義から、次の関係があります。

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 - \frac{T \cdot r}{n} \right)^n &= \lim_{n \rightarrow \infty} \left\{ \left(1 + \frac{1}{n/(-T \cdot r)} \right)^{n/(-T \cdot r)} \right\}^{-T \cdot r} = e^{-T \cdot r} \\ \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 - \frac{T \cdot r}{n} \right) &= 1 \end{aligned}$$

これを用いると、

$$\therefore \lim_{n \rightarrow \infty} Q_n = Q_0 e^{-T \cdot r} + \frac{q_{in}}{r} (1 - e^{-T \cdot r}) = \frac{q_{in}}{r} + \left(Q_0 - \frac{q_{in}}{r} \right) e^{-T \cdot r} = Q(T)$$

これで大気中の CO₂ 量 Q の時間 T に対する連続関数を求めることが出来ました。この関数 Q の $T \rightarrow \infty$ の極限值=定常解を求めると次の通りです。

$$\lim_{T \rightarrow \infty} Q(T) = \frac{q_m}{r}$$

【補足】ネイピア数の定義

ネイピア数 e は次のように定義されます。

$$e = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n$$

二項定理から、

$$\left(1 + \frac{1}{n}\right)^n = \sum_{i=0}^n {}^n C_i \left(\frac{1}{n}\right)^i = 1 + \frac{n}{1!} \frac{1}{n} + \frac{n(n-1)}{2!} \frac{1}{n^2} + \frac{n(n-1)(n-2)}{3!} \frac{1}{n^3} + \dots + \left(\frac{1}{n}\right)^n$$

二項定理を利用して $n \rightarrow \infty$ の場合の極限を考えます。

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n = \lim_{n \rightarrow \infty} \left\{ 1 + 1 + \frac{\frac{n}{n} \frac{n-1}{n}}{2!} + \frac{\frac{n}{n} \frac{n-1}{n} \frac{n-2}{n}}{3!} + \dots \right\} = 1 + 1 + \frac{1}{2!} + \frac{1}{3!} + \dots$$

上式の右辺から、この極限値を n の関数と考えれば n の増加にともなって単調に増加する関数になります。

この関数が $n \rightarrow \infty$ において、有限の値に収束するかどうかを確認することにします。 n を有限の整数とした場合、次の関係が成り立ちます。

$$1 + \frac{1}{2!} + \frac{1}{3!} + \dots + \left(\frac{1}{n}\right)^n < 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{2^2} + \dots + \frac{1}{2^{n-1}} = \frac{1 \left\{ 1 - \left(\frac{1}{2}\right)^n \right\}}{1 - \frac{1}{2}} = 2 \left\{ 1 - \left(\frac{1}{2}\right)^n \right\}$$

不等式の右辺は、初項 1、公比 1/2 の等比数列の第 n 項までの和を示しています。上の不等式の右辺に 1 を加えて、 $n \rightarrow \infty$ の極限を求めると次のようになります。

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left[1 + 2 \left\{ 1 - \left(\frac{1}{2}\right)^n \right\} \right] = 3 \quad \therefore \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n < 3$$

つまり、ネイピア数 e は $2 < e < 3$ の範囲の有限の値に収束することになります。

【ex.】 $\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n$ の値を求めよ。

$n = -m$ と変数変換すると

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \left(1 - \frac{1}{m}\right)^{-m} = \lim_{m \rightarrow \infty} \left(\frac{m-1}{m}\right)^{-m} = \lim_{m \rightarrow \infty} \left(\frac{m}{m-1}\right)^m = \lim_{m \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{m-1}\right)^m = \lim_{m \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{m-1}\right) \left(1 + \frac{1}{m-1}\right)^{m-1} = e$$

参考:微分形式による循環モデル

q_{in} 、 q_{out} 、 Q を連続量とすると、 Q の時間 t に対する変化率と q_{in} 、 q_{out} の関係は次のように表すことができます。

$$\frac{dQ}{dt} = q_{in} - q_{out} = q_{in} - r \cdot Q \quad \therefore \frac{dQ}{dt} + r \cdot Q = q_{in} \quad \text{①}$$

まず、 $q_{in}=0$ の一般解を求めます。

$$\frac{dQ}{Q} = -r \cdot dt \quad \text{両辺を積分すると} \quad \ln Q = -rt + c_1 \quad \therefore Q = e^{c_1} \cdot e^{-rt} = c_2 \cdot e^{-rt} \quad \text{②}$$

また、 $Q = \frac{q_{in}}{r}$ は明らかに①の特殊解になります。以上から、①の一般解は、

$$Q = \frac{q_{in}}{r} + c_2 \cdot e^{-rt} \quad \text{③}$$

初期条件として $t=0$ において $Q=Q_0$ とすれば、

$$c_2 = Q_0 - \frac{q_{in}}{r} \quad \therefore Q = \frac{q_{in}}{r} + \left(Q_0 - \frac{q_{in}}{r} \right) e^{-rt}$$

となり、離散モデルにおいて分割数 n を無限大にした場合と同じになります。

一般解に対して $r=0.3$ 、 $t=0$ の初期値を Q_0 、 $q_{in}=0$ として 10 年後の残留量を求めると次の通りです。

$$Q_{10} = Q_0 \cdot e^{-0.3 \times 10} = 0.05Q_0$$

つまり連続モデルでは、現在大気中に存在する CO_2 量の内、10 年後まで残留している CO_2 量は 5% 程度ということです。

2-1-3 人為的な影響を推定する

大気中の二酸化炭素濃度の変動は比較的遅いので、前節で求めた大気中二酸化炭素量 Q の定常解を利用して人為的な影響を推定することにします。

まず始めに、冒頭に示した IPCC2007 年の図における産業革命以前の状態について検討しておきます。

$$q_{in} = 1196 + 706 = 1902 \text{ (億トン/年)} = 190.2 \text{ (Gt/年)}$$

$$q_{out} = 2 + 1200 + 700 = 1902 \text{ (億トン/年)} = 190.2 \text{ (Gt/年)}$$

$$Q = 5970 \text{ (億トン)} = 597.0 \text{ (Gt)}$$

以上から、 $q_{in}=q_{out}$ なので定常状態です。年吸収率は

$$r = q_{\text{out}}/Q = 190.2/597 \doteq 0.319$$

同様に、現在の数値を再掲しておきます。

$$q_{\text{in}} = 218.2 \text{ (Gt/年)}$$

$$q_{\text{out}} = 215.0 \text{ (Gt/年)}$$

$$Q = 762.0 \text{ (Gt)}$$

以上から、 $q_{\text{in}} \neq q_{\text{out}}$ ですが、それほど大きな違いはないのでここでも定常解を用いて推定することになります。

$$r = q_{\text{out}}/Q = 215.0/762.0 \doteq 0.282$$

現在大気中に存在する CO₂ の内、10 年後の残留量は

$$Q_{10} = Q_0 \cdot e^{-0.282 \times 10} = 0.06Q_0$$

つまり、10 年後の残留量は 6% 程度であり、大部分の CO₂ は入れ替わってしまうことになります。

現状では定常状態に至る途中にあるので、年吸収率 $r = 0.282$ に対する定常状態における大気中 CO₂ 量を求めると次の通りです。

$$Q = 218.2/0.282 \doteq 773.8 \text{ Gt}$$

ここで、炭素重量 2Gt が 1ppm に対応すると仮定すると、定常状態における大気中 CO₂ 濃度は 386.9ppm です。

大気中 CO₂ 量に占める、化石燃料の燃焼による影響はどの程度でしょうか？年間の CO₂ 供給量 $q_{\text{in}} = 218.2 \text{ Gt/年}$ に占める化石燃料の燃焼による CO₂ 量は $\Delta q_{\text{in}} = 6.4 \text{ Gt/年}$ です。以上から、化石燃料の燃焼による大気中 CO₂ 量は次の通りです。

$$\Delta Q = \Delta q_{\text{in}}/r = 6.4/0.282 \doteq 22.7 \text{ Gt}$$

大気中 CO₂ 濃度に換算して 11.3ppm です。これは大気中 CO₂ 濃度の $11.3/386.9 \doteq 0.029 = 2.9\%$ です。

大気中 CO₂ 量は産業革命以前の定常状態における 597.0Gt から 773.8Gt に 176.8Gt 増加することになります。増加する 176.8Gt の内、化石燃料の燃焼による CO₂ 量は 22.7Gt、比率にして $22.7/176.8 = 0.128 = 12.8\%$ 、残りの 87.2% は自然増なのです。

現在の標準的な人為的 CO₂ 地球温暖化仮説では、産業革命以後の大気中 CO₂ の増加は、化石燃料の燃焼によって大気中に放出された CO₂ 量の半分程度が蓄積されたことによるものとしています。しかし、

これまで検討してきたように、大気中 CO_2 に対する年吸収率を 0.3 程度とすると 10 年経過すると残留量は 5~6%、大部分が入れ替わってしまうため、化石燃料起源の CO_2 だけが蓄積し続けることはありません。

その結果、現在の大気中 CO_2 量に占める化石燃料起源の CO_2 量の割合は 2.9% 程度に過ぎず、産業革命以後に増加した CO_2 量 176.8Gt に対しても 12.8% に過ぎないのです。

以上から、仮に近年観測されている地球温暖化の原因が大気中 CO_2 濃度の上昇による付加的な温室効果の増大だとしても、大気中 CO_2 濃度上昇の主要な原因は自然現象であり、人為的な CO_2 排出量を減らすことは無意味です。人為的 CO_2 地球温暖化仮説は既にこの段階で崩壊しているのです。

2-2 CO_2 循環モデルと蓄積モデル

人為的 CO_2 地球温暖化仮説では産業革命以後の大気中の CO_2 濃度の上昇の原因は、化石燃料の燃焼に伴う人為的に放出された CO_2 量の半分程度が大気中に蓄積し続けた結果だと主張しています。これは CO_2 濃度の増加による地球温暖化の原因が自然現象であるのか人為的な影響であるのかの根幹をなす重要な問題なので、ここで改めて検討することにします。

2-2-1 産業革命以前の大気中 CO_2 濃度の変動

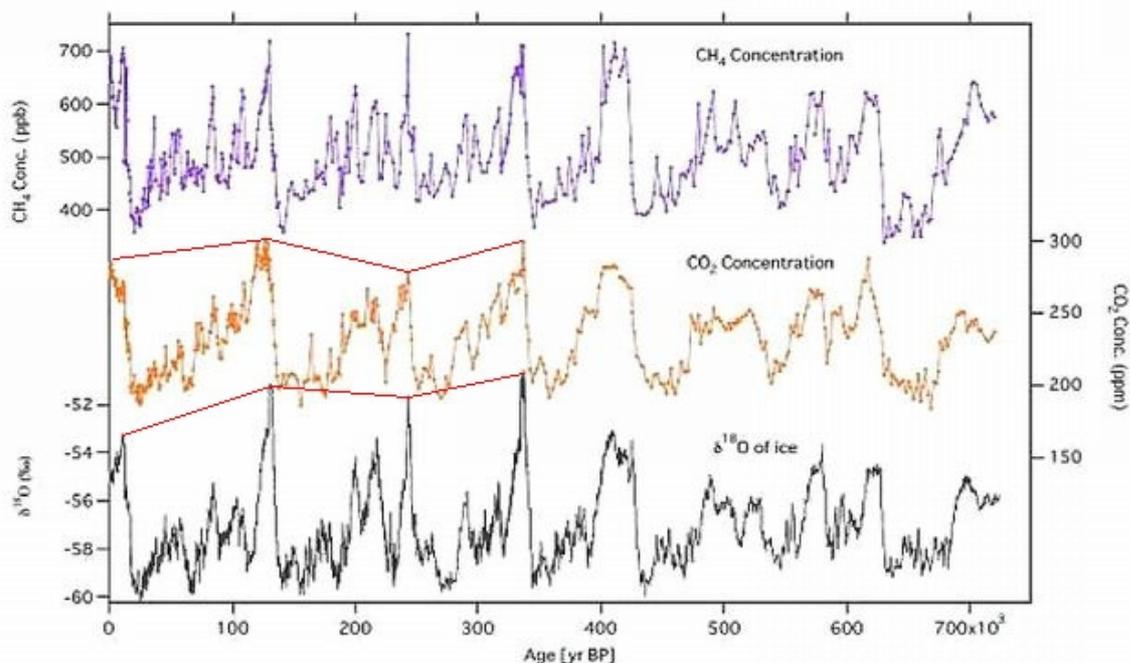


図1. ドームフジ深層氷床コアから得られた過去 72 万年間の CH_4 濃度 (紫色の点) と CO_2 濃度 (オレンジ色の点) の変動。下部に氷の $\delta^{18}\text{O}$ も示す。

南極氷床のアイスコアの分析結果から、ここ 70 万年程度の期間、有史以前においても大気中に含まれる CO_2 濃度は気温の変動にともなって 100ppm 程度の増減を繰り返しています。これは地球環境の変化による自然現象として、地表面環境 (海洋を含む) から大気中への CO_2 の放出量 q_{in} と、大気から地表面環

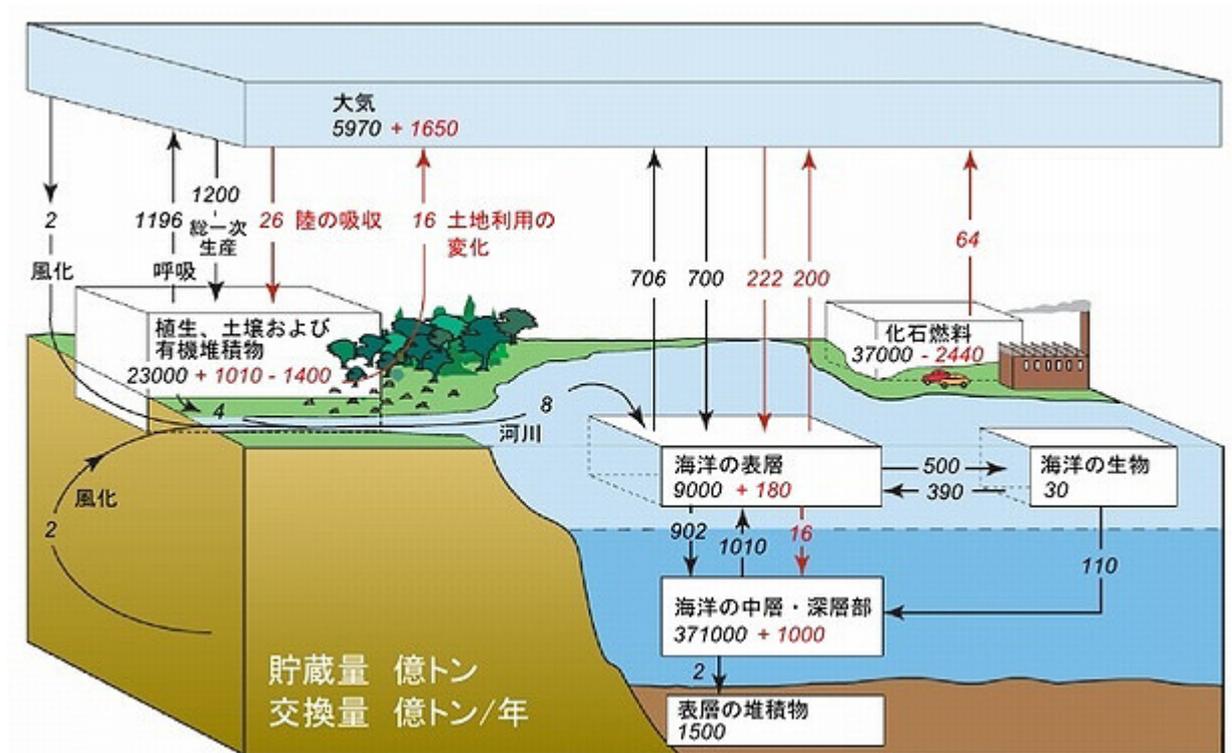
境への CO₂ 吸収量 q_{out} が変動していることを示しています。大気中に存在する CO₂ 量を Q とすると、

$$1) \quad q_{in} > q_{out} \quad \frac{dQ}{dt} = q_{in} - q_{out} > 0$$

$$2) \quad q_{in} \leq q_{out} \quad \frac{dQ}{dt} = q_{in} - q_{out} \leq 0$$

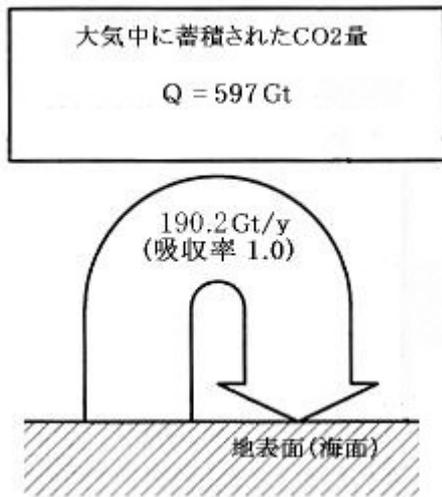
2-2-2 大気中 CO₂ 量を表す二つのモデル

次に、IPCC2007 年による大気を巡る炭素循環の概要を再掲します。



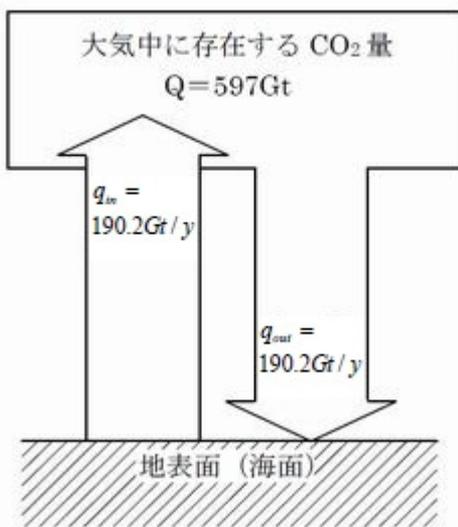
この IPCC の図によると、産業革命以前(黒い文字で示す値)においては q_{in} と q_{out} は均衡しており、大気中の CO₂ 量も安定していたことになっています。しかし、実際にはアイスコア分析の結果からわかるように、長期的には自然変動によって大気中の CO₂ 濃度はかなり大きな幅で変動していたのです。

現在、大気中の CO₂ 量を表す二つのモデルが提案されています。一つはこれまで示してきた循環モデルであり、もう一つは人為的 CO₂ 地球温暖化仮説の根幹をなす人為的 CO₂ 蓄積モデルです。この二つのモデルを使って大気中の CO₂ 量の変化を考えてみることにします。IPCC2007 年の模式図の産業革命以前の定常状態について蓄積モデルは次の図のように表すことができます。



蓄積モデルでは、地表面環境から放出された CO₂ はその年に全て地表面環境が吸収するので、そのため、前年までに大気中に存在していた CO₂ 量 Q とはまったく独立に現象が進みます。

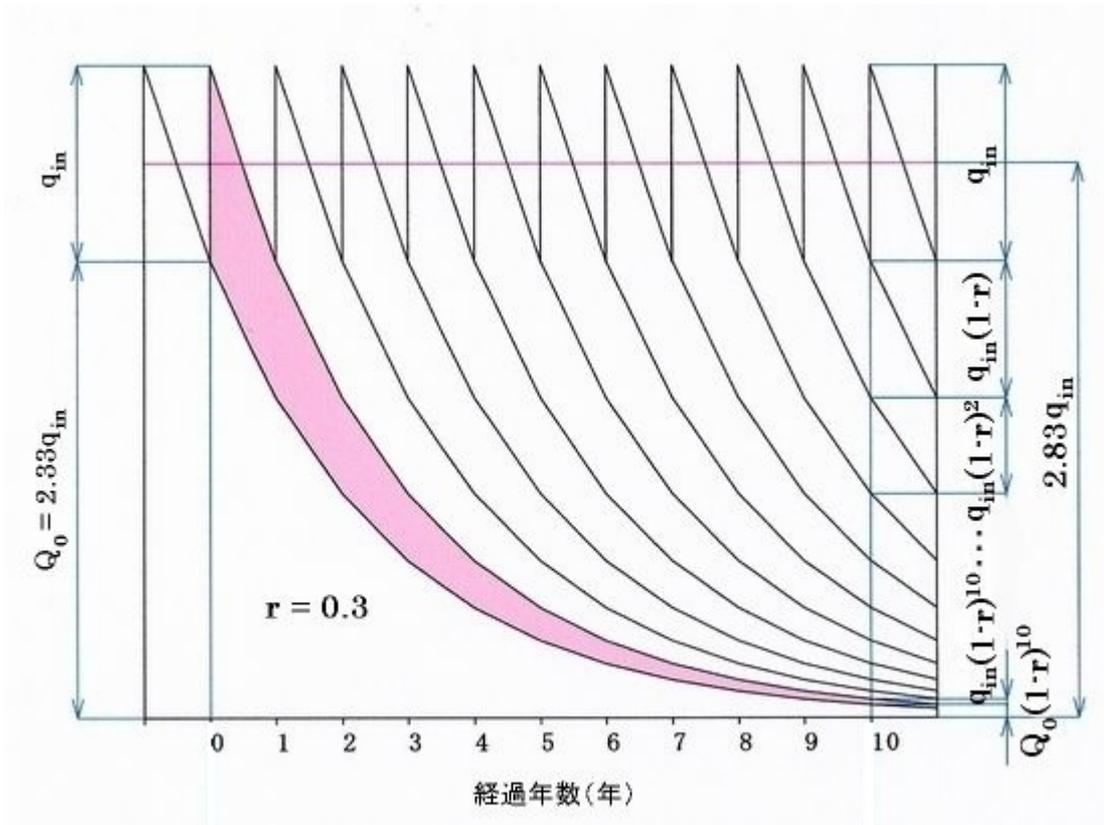
これに対して循環モデルは次のように表すことができます。



循環モデルでは、地表面環境から放出された CO₂ である q_{in} は大気中に拡散し、前年までに大気中に存在していた CO₂ 量 Q_0 と混合し、 $(Q_0 + q_{in})$ の中から地表面環境は 1 年間に q_{out} だけ吸収するので(→大気中二酸化炭素濃度の構造)。初期値 Q_0 で n 年度後の期末では次の通りです。

$$Q_n = Q_0(1-r)^n + q_{in}(1-r)^n + q_{in}(1-r)^{n-1} + \dots + q_{in}(1-r)$$

定常状態にある $r=0.3$ の離散的な循環モデルの 10 年経過した場合の大気中 CO₂ 量の模式図を示します。



q_{out} の $(Q_0 + q_{in})$ に対する比率を吸収率 r とします。つまり初年度の収支は次のように表すことができます。

$$(Q_0 + q_{in}) \times r = Q \times r = q_{out}$$

二つのモデルはいずれも IPCC2007 年の模式図の産業革命前の定常状態を正しく表現しています。ところが、その意味するところはまったく異なっています。

IPCC2007 年の模式図の数値を用いると、循環モデルでは

$$r = \frac{q_{out}}{Q} = \frac{190.2 \text{ Gt/年}}{597 \text{ Gt}} = 0.319$$

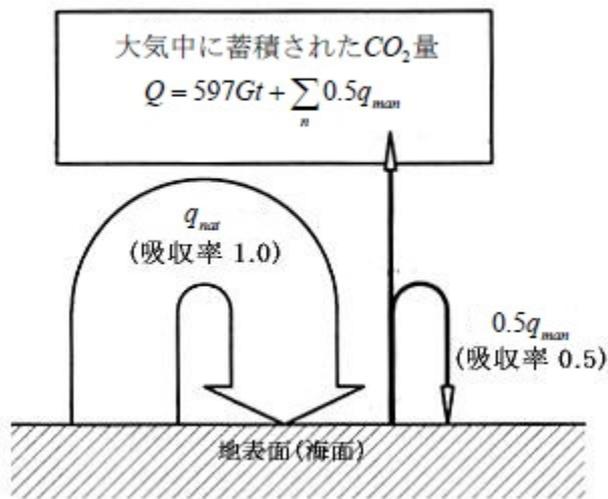
という関係で、 Q が q_{out} と関連しています。その結果、循環モデルでは定常状態における q_{out} に対して一意的に Q が定まります。つまり、循環モデルでは $q_{in} = q_{out} = 190.2 \text{ Gt/年}$ に対する必然的な結果として大気中の CO_2 量 $Q = 597 \text{ Gt}$ が定まっているのです。

これに対して蓄積モデルでは Q と q_{out} は互いに独立なので、 q_{out} に対して Q はいかなる値でも取ることが出来るのです。つまり、蓄積モデルでは $q_{in} = q_{out} = 190.2 \text{ Gt/年}$ の時、偶然その時の大気中の CO_2 量が $Q = 597 \text{ Gt}$ であったに過ぎないのです。

2-2-3 産業革命から現在までを考える

ここでは、IPCC2007 年の産業革命以前の状態から現在に至る変化について考えることにします。

(1) 人為的 CO₂ 蓄積モデルによるシミュレーション



人為的 CO₂ 蓄積モデルのこの間の大気中の CO₂ 量の変化を表すモデルは上図の通りです。産業革命以前から現在に至るまで、自然現象による地表環境からの CO₂ 放出量 q_{nat} は

$$q_{nat} = 190.2 + 1.6 + 20.0 = 211.8 \text{ (Gt/年)}$$

21.6Gt/年だけ増えましたが、人為的 CO₂ 蓄積モデルではこの自然の変動分はすべて単年度で地表面環境によって完全に吸収(自然放出の CO₂ に対する吸収率は常に 1.0)され、大気中の CO₂ 量 Q には一切変化をもたらさないとしています。一方、これとはまったく別に、化石燃料の燃焼によって人為的に放出された CO₂ 量 q_{man} については、その 50%だけが地表面環境に吸収され、残りの 50%が大気中に“蓄積”されるとしています。これは、C.D.Keeling の報告の誤った一面的な解釈から生まれたモデルです。(→大気中二酸化炭素濃度と気温変動)

人為的 CO₂ 蓄積モデルについて、東大 IR3S『地球温暖化懐疑論批判』の中で東北大学の明日香壽川は次のように述べています。

炭化水素燃料の燃焼によって大気に付加される二酸化炭素による炭素の供給量は6Gt程度であって、年間に大気と生態系・海洋表層水と交換される二酸化炭素による炭素量200Gtのわずか3%に過ぎない（近藤 2006）。

反論

これも非常にミスリーディングな議論である。大気、陸、海の間での二酸化炭素のやりとり（自然の炭素循環）は、例えて言えば、年度末の残高（大気中二酸化炭素濃度）の変化は大きくないものの、年度途中での出し入れが激しい貯金口座の預入・引出のようなものである（だから循環という名前がついている）。一方、人為

的二酸化炭素排出は、わずかずつであるものの、年度末残高を増加させる積立貯金になぞらえることが出来る（人類による二酸化炭素排出量は産業革命以降現在までの累計で約350Gt）。この累計で約350Gtというのは、産業革命以前の大気中二酸化炭素存在量の約7割であり、自然界の炭素循環過程での変動では吸収不能な量である。なお、これに関しては向井（2007）を参照されたい。

明日香によると、産業革命以降に人為的に放出された CO₂ 量の合計は約 350Gt なので、

$$Q = 597Gt + 0.5 \sum_n q_{man} = 597Gt + 0.5 \times 350Gt = 772Gt$$

だと主張しているわけです。

明日香グループの人為的 CO₂ 蓄積モデルについてももう少し具体的な記述を引用しておきます。

議論 18

人為的に排出された二酸化炭素の大気中滞留時間は短い。

証拠 1

人間活動によって放出されたCO₂のうち、大気中に長期的に残存する量は等比数列の和として計算され、3.33年分の放出量にあたる量しか残存しない（樋田 2007；樋田2008）。

反論

「人間活動によって放出されたCO₂のうち、約3割が海洋や森林に吸収される」（5割と言った方が実態には近いが、樋田氏の議論に合わせて3割という値を使う）という表現がよくなされる。これは丁寧に言い換えれば、「森林や海洋はCO₂を放出したり吸収したりしているが、地球全体では現在正味で吸収となっている。その1年間の吸収量は、同じ年に人間活動によって放出されるCO₂量の約3割にあたる」という意味である（人間活動によって放出されたCO₂分子が選択的に吸収されるという主張は含まれていないことに注意）。すなわち、樋田氏が主張しているような「ある年に人間活動によって放出されたCO₂は、その年のうちに3割が吸収され、次の年には残りの7割のうちの3割がさらに吸収されるという過程が無限に繰り返される」という意味ではない。

したがって、人間活動によって放出されるCO₂量をQ、森林や海洋による吸収量のQに対する割合をrとし、Qとrは時間変化しないと仮定すれば、大気中に残存するCO₂量の正しい計算法は、

$$0.5 \sum_n q_{man} \text{ に対応}$$

$$Q \times (1-r) + Q \times (1-r) + Q \times (1-r) + \dots$$

ということになる。この数列の和は収束せず、人間活動によるCO₂放出が続く限り大気中のCO₂量は増えていくことになる。

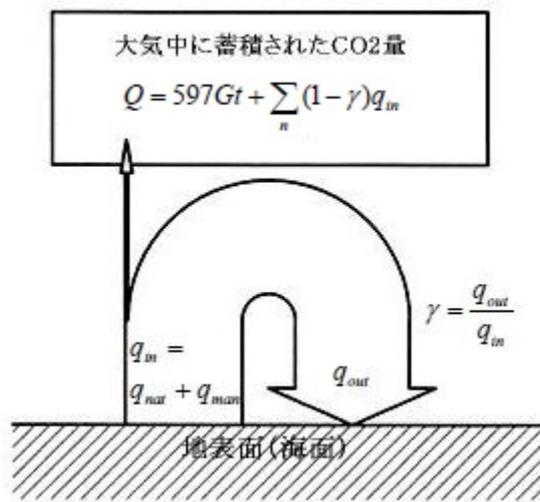
なお、ここで問題になっているのは大気中CO₂の収支に関わる問題であるので、本質を損なわずに次のような金銭の収支に置き換えてみる。

冒頭の樋田氏に対する「5割と言ったほうが実態に近い」というコメントは無意味です。樋田氏は既に紹介している離散的な表現による循環モデルを提示しており、大気中のCO₂量Qにたいする地表面環境の年間吸収量q_{out}の比率を吸収率rと定義しています。

これに対して、明日香グループの人為的CO₂蓄積モデルの吸収率rは、年間的人為的なCO₂放出量q_{man}（文章の中ではQ）の内どれだけが地表面環境に吸収されるかという割合です。

また、明日香グループがわざわざ言及している「人間活動によって放出されたCO₂分子が選択的に吸収されるという主張は含まれていないことに注意」という不自然な解説は、私や樋田氏が彼らのモデルに対して、「人為的に放出されたCO₂だけが大気中に選択的に蓄積するということはありません」と批判していることに対する弁明ですが、「選択的な蓄積」を「選択的な吸収」にすり替えています。

彼らが主張しているように、人為的に放出されたCO₂だけが特別な振る舞いをするわけではないというのなら、蓄積モデルは次の図のように修正しなくてはなりません。



つまり、地表面環境から単年度に放出される自然起源のCO₂量であるq_{nat}と人為的なCO₂量であるq_{man}の合計が地表面環境からの年間CO₂放出量q_{in}であり、q_{in}に対して地表面環境は年間q_{out}= γ ×q_{in}だけを吸収し、大気中には(1- γ)q_{in}が蓄積されることとなります。q_{nat}とq_{man}が一様に混合していれば、大気中に存在する人為的なCO₂量は1%台になり、循環モデルによる推計量3%程度よりも遥かに小さくなります。

明日香グループが主張するように、産業革命以降の大気中CO₂濃度の上昇が人為的に放出されたCO₂の半量程度が継続して蓄積した結果であると主張するならば、あくまでも人為的に放出されたCO₂だけが選択的に大気中に蓄積しない限りあり得ないのです。

人為的CO₂蓄積モデルによる産業革命以後の大気中CO₂量のシミュレーションを示します。

自然のCO₂放出量q_{nat}の時間に対する線形モデルを考えます。

$$q_{nat}(0) = 190.2 \text{ Gt/年}$$

$$q_{nat}(200) = 190.2 \text{ Gt/年} + 21.6 \text{ Gt/年} = (190.2 + 200a) \text{ Gt/年} \quad \therefore a = 0.108$$

$$\therefore q_{nat}(t) = (190.2 + 0.108t) \text{ Gt/年}$$

人為的なCO₂放出量q_{man}を時間の3次関数でモデル化します。

明日香によると200年間の蓄積量は350Gtなので

$$\int_0^{200} a \cdot t^3 dt = \left[\frac{a}{4} t^4 \right]_0^{200} = \frac{a}{4} (200)^4 = 350 \quad \therefore a = 0.875 \times 10^{-6}$$

$$\therefore q_{man}(t) = 0.875 \times 10^{-6} t^3 \text{ Gt/年}$$

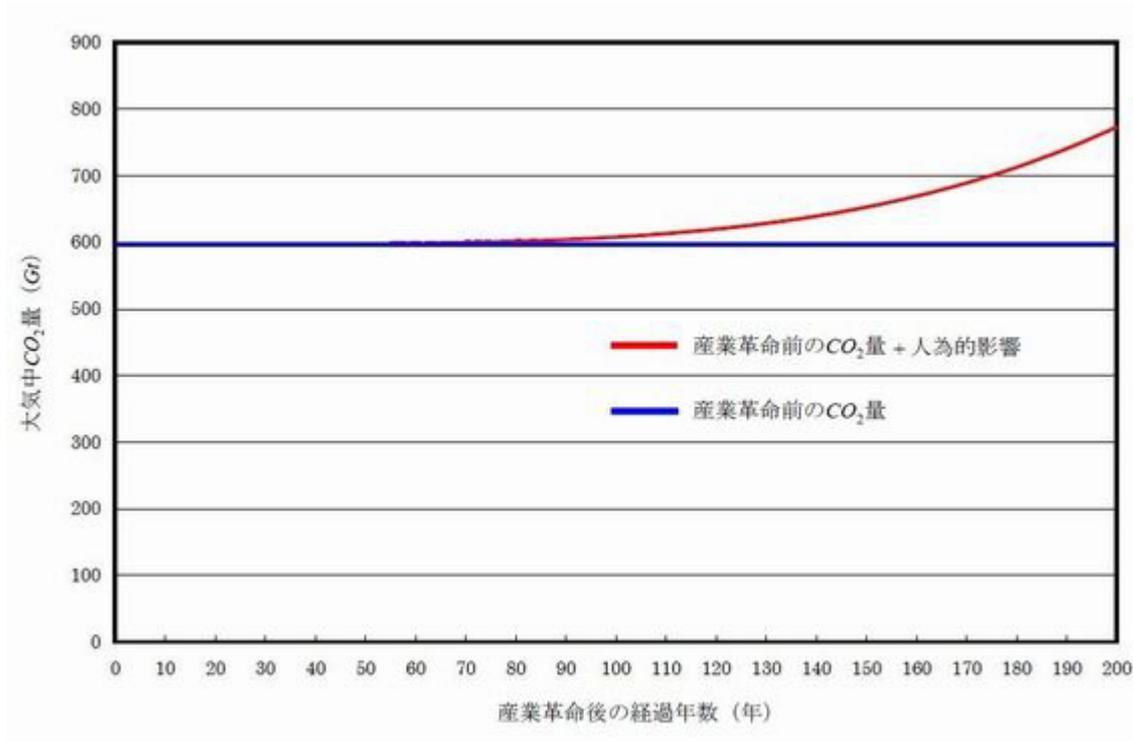
地表面環境の年間CO₂放出量q_{in}は次の通りです。

$$q_{in}(t) = q_{nat}(t) + q_{man}(t) = (190.2 + 0.108t + 0.875 \times 10^{-6} t^3) \text{ Gt/年}$$

人為的CO₂蓄積モデルは次のように表すことができます。

$$Q(t) = 597 \text{ Gt} + 0.5 \sum_0^t q_{man}(t)$$

以上によるシミュレーション結果は次の図のようになります。



(2)人為的 CO₂ 蓄積モデルの欠陥

人為的 CO₂ 蓄積モデルは産業革命以降の大気中の CO₂ 量を表すことは可能ですが、物理的に不合理な数値モデルです。以下に問題点を整理しておきます。

①地表面環境から大気中に放出された CO₂ が、大気中に存在している CO₂ と混合しない、あるいはその年に放出された CO₂ だけが選択的に地表面環境に吸収されることは自然現象として不可能です。

②地表面環境から大気中に放出される自然起源の CO₂ と人為的な化石燃料の燃焼による CO₂ が混合しない、あるいは自然起源の CO₂ は完全に地表面環境に吸収されて、人為的な CO₂ だけが選択的に大気中に蓄積されることは自然現象として不可能です。

以上 2 点は、「人為的」「CO₂ 蓄積」モデルが数値モデルとしては可能なモデルであったとしても、大気中に放出された CO₂ を区別することは不可能であり、CO₂ が放出された時期や発生源の如何を問わず、同じ振る舞いをするという自然現象と本質的に相容れないモデルであることに起因しています。

この本質的な欠陥を弁明するために東大 IR3S『地球温暖化懐疑論批判』議論 18 において「人間活動によって放出された CO₂ 分子が選択的に吸収されるという主張は含まれていないことに注意」という文章が加えられています。しかし既に説明した通り、これを区別しなくては明日香壽川が同書議論 16 で述べている「一方、人為的二酸化炭素排出は、わずかずつであるものの、年度末残高を増加させる積立貯金になぞらえることが出来る(人類による二酸化炭素排出量は産業革命以降現在までの累計で約 350Gt)。この累計で約 350Gt というのは、産業革命以前の大気中二酸化炭素存在量の約 7 割であり、自然界の炭素循

環過程での変動では吸収不能な量である。」という主張と矛盾する結果になってしまうのです。

今問題にしているのは明日香の言葉を使えば、なぜ年度末残高に含まれるのが人為的二氧化碳排出だけなのか？という問いなのです。明日香は産業革命以降の人為的二氧化碳排出の総量が 350Gt と言っていますが、同じ期間の自然要因の変動による地表面環境からの CO₂ 排出の増加量の総量は 200 年間では 2000Gt 程度(シミュレーションに用いた線形モデルで算定)になるでしょう。これを発生源別に CO₂ を『区別しない』のであれば、蓄積モデルを用いたとしても、大気中 CO₂ 濃度を増大させた主因は主に海洋からの CO₂ 放出量の増加という自然現象だという他はありません。彼らの用いているのは蓄積モデルの中でも、人為的な CO₂ だけを特別扱いする『人為的 CO₂ 蓄積モデル』以外にないのです。

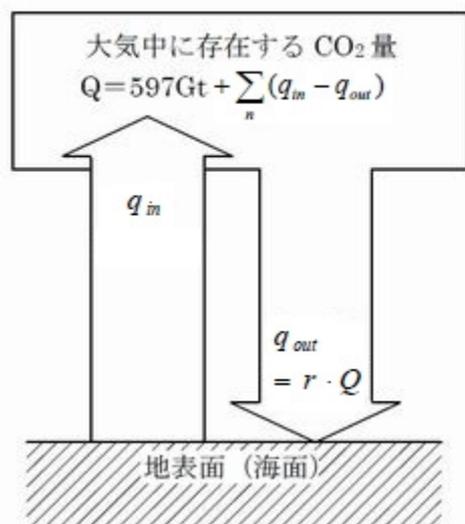
③地表面環境からの CO₂ 放出量 q_{in} が平衡状態から少しでも増加すれば、大気中の CO₂ 蓄積量 Q は収束しない=発散するという極めて不安定なモデルは現実の自然現象としてありえません。

④明日香グループの人為的 CO₂ 蓄積モデルは地表面環境の CO₂ 収支が放出 $q_{in} >$ 吸収 q_{out} であるときだけ、その不平衡分 ($q_{in} - q_{out}$) を蓄積するバッファとして大気が機能するという不可解なモデルです。放出 $q_{in} <$ 吸収 q_{out} の場合にはどうなるのかは説明されておらず不明です。

しかし、アイスコアの分析に示された歴史的に繰り返されてきた大気中 CO₂ 濃度の長期的な増減を蓄積モデルで表すためには、放出 $q_{in} <$ 吸収 q_{out} の場合には大気中に蓄積されている CO₂ を地表面環境が吸収することを容認しなければなりません。

つまり大気中の CO₂ は、CO₂ の循環構造から孤立して存在しているわけではなく、地表面環境から CO₂ が供給されるだけでなく、地表面環境に吸収されることで地表面環境との間で交換されているのです。明日香グループや標準的な人為的 CO₂ 地球温暖化仮説の「産業革命以後の大気中 CO₂ 濃度の上昇の主要な原因は人為的に放出された CO₂ の“蓄積”である」という主張は不合理なのです。

(3) 循環モデルによるシミュレーション

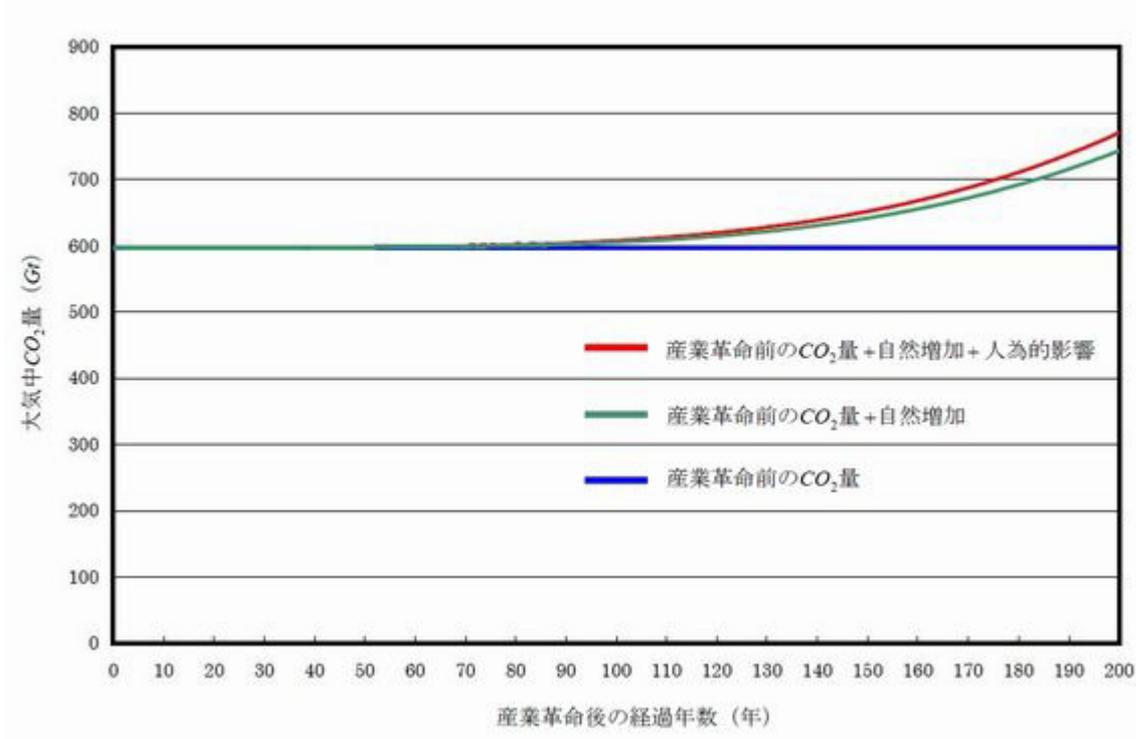


循環モデルの大気中の CO₂ 量の変化を表すモデルは上図の通りです。 q_{nat} 、 q_{man} 、 q_{in} 、 Q は人為的 CO₂ 蓄積モデルと同じモデルを使います。

地表面環境のCO₂の放出と吸収はほとんど均衡しているので $q_{out}(t) \cong q_{in}(t)$ によって近似できるものとします。故に吸収率 $r(t)$ は次式で近似します。

$$r(t) = \frac{q_{out}(t)}{Q(t)} \cong \frac{q_{in}(t)}{Q(t)}$$

$r(t)$ を用いて自然変動による影響と人為的な影響をシミュレーションした結果は次の図のようになります。



産業革命以後の大気中のCO₂増加量の大部分は主に海洋からのCO₂放出量の自然増加の影響であり、人為的な化石燃料の燃焼による増加量は14%程度に過ぎません。また、大気中のCO₂量全体に占める人為的な化石燃料の燃焼によるCO₂量の割合は3.2%程度です。

3. CO₂地球温暖化仮説の崩壊

3-1 大気中CO₂濃度と気温変動

人為的CO₂地球温暖化仮説では、大気中のCO₂濃度の上昇が気温上昇をもたらすとされていますが、歴史的な痕跡や気象観測データから大気中のCO₂濃度と気温の変動の因果関係を確認しておくことにします。

3-1-1 南極氷床に残された痕跡

南極の氷床の厚さは数1000mの厚さがあります。南極の氷床は南極に降り積もった雪が自重によって押しつぶされたものです。その結果、氷床に残された気泡は雪が降り積もった当時の大気を保持してい

ます。積雪が氷になるまでにはかなりの時間が必要だと考えられるため、氷床から得られたデータの時間に対する解像度はそれほど高くない(極値が平滑化される)と考えられますが、長期間の変動傾向を知る手掛かりを与えています。

現在日本のドームふじ基地で採取されたアイスコアからは深さ約 3000m、過去 70 万年程度のデータが得られています。左端が現在を示しています。

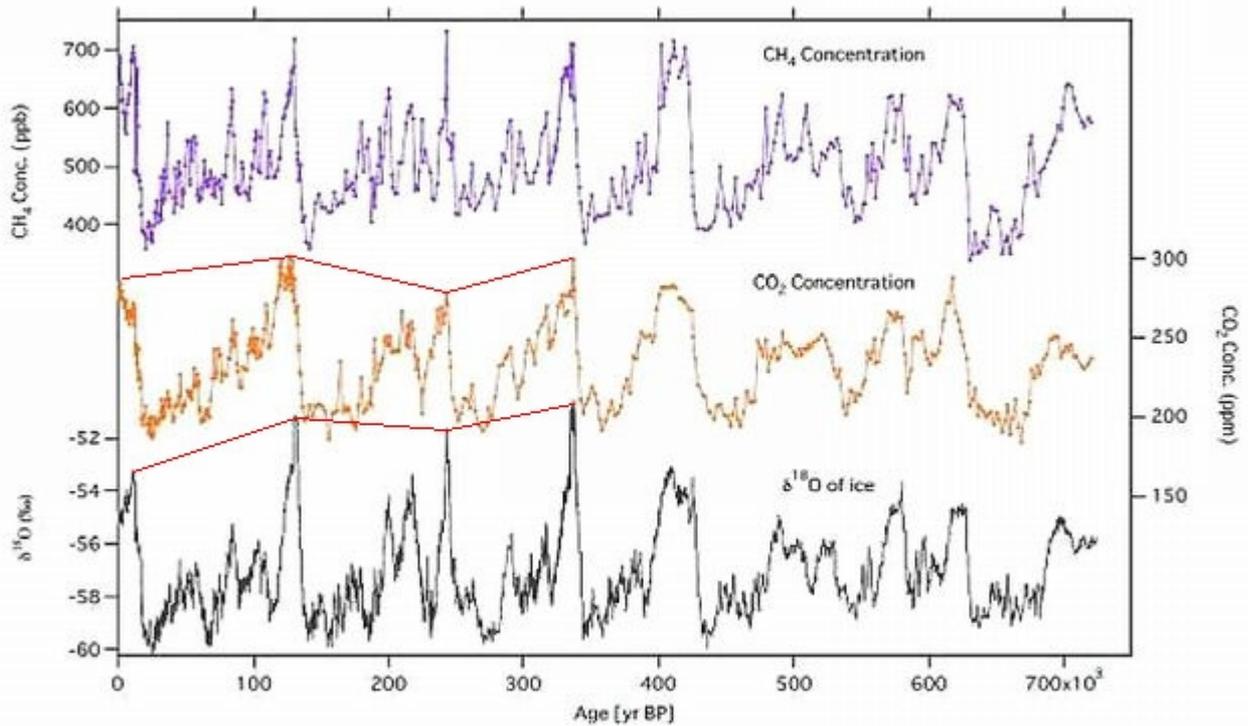


図1. ドームふじ深層氷床コアから得られた過去 72 万年間の CH₄ 濃度 (紫色の点) と CO₂ 濃度 (オレンジ色の点) の変動。下部に氷の δ¹⁸O も示す。

図には、メタン CH₄ 濃度、CO₂ 濃度、酸素の同位体である ¹⁸O の同位体比率である δ¹⁸O の変動を示しています。δ¹⁸O は次式で与えられます。

$$\delta^{18}O = \left(\frac{\left(\frac{{}^{18}O}{{}^{16}O} \right)_{sample}}{\left(\frac{{}^{18}O}{{}^{16}O} \right)_{reference}} - 1 \right) \times 1000 \text{ (‰)}$$

¹⁸O は ¹⁶O に比べて原子量が大きいため ¹⁸O を含む水は蒸発しにくい性質があります。その結果、気温が高いほど氷に含まれる ¹⁸O の割合が大きく、気温が低いほど ¹⁸O の割合が小さくなります。そこで気温の既知の ¹⁸O と ¹⁶O の比率(reference)に対する試料(sample)の比率の偏差の 1000 分率によって気温を推定することが出来るのです。δ¹⁸O が大きいほど気温は高いことを示しています。

アイスコアの分析結果から、気温変動と同期して変動するのは CO₂ だけではなく CH₄ も同様の傾向を示しています。δ¹⁸O や CO₂ 濃度、CH₄ 濃度は 10~12 万年程度の周期で変動しています。

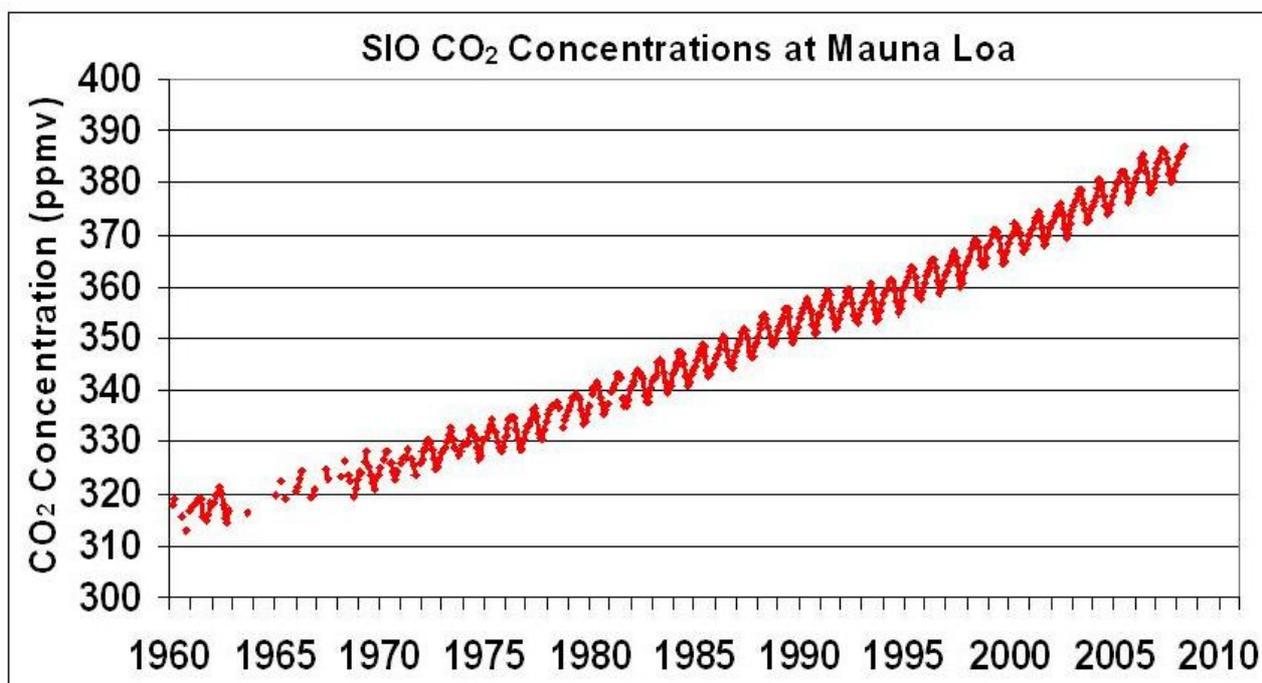
前を中心とする高温期から次第に低温化していることがわかります。また、大気中の CO₂ 濃度についても特に高い数値ではありません。

3-1-2 C.D.Keeling による CO₂ 精密連続観測

近年の大気中の CO₂ 濃度の連続精密観測の先駆者が C.D.Keeling です。彼のグループによる観測はハワイのマウナ・ロア山と南極 South Pole に於いて 1958 年に開始されました。CO₂ 濃度観測データはインターネット上に公開されています。



<http://cdiac.ornl.gov/trends/co2/sio-keel.html>



C.D.Keeling は、彼の観測データを分析し、大気中の CO₂ 濃度の上昇は、化石燃料の燃焼によって人為的に放出された CO₂ 量の半分程度に相当するという報告を行いました。この Keeling の報告に対する誤解がその後の温暖化論議に大きな誤りをもたらすことになりました。

Keeling の報告した事実は、人為的に放出された CO₂ の半量がそのまま大気中に蓄積していることを意味しているわけではありません。地球大気には年間 200Gt 程度の CO₂ が放出されていますが、化石燃料の燃焼に伴う CO₂ 放出量はその内の 3%程度にすぎません。同時に、年間 200Gt 程度の CO₂ が大気中から地表環境に吸収されており、CO₂ の大気中の平均滞留時間は 3 年程度です(→大気中二酸化炭素濃度の構造)。

C.D.Keeling はその後、彼の南極とハワイにおける CO₂ 濃度の観測データから、CO₂ 濃度の季節変動と長期的な変動傾向を取り除くことによって、世界平均気温偏差の変動と大気中 CO₂ 濃度の短期変動を比

較することによって次のグラフを公開しました。

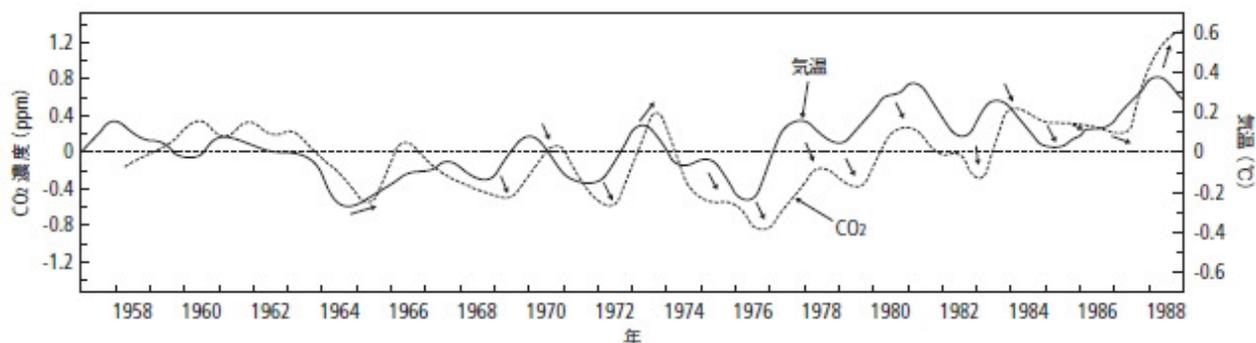


図6 観測値から長期的上昇傾向と季節変化を取り除いた大気中二酸化炭素濃度変動と気温変動の関係
(出所：根本 (1994) , p.151)

この図からわかるように、まず気温が変動し、その後を追うように大気中の CO₂ 濃度が変動することがわかります。つまり、数年というタイムスケールにおいても、前節で示した数万年スケールの変動と同様に、気温変動が原因となって大気中の CO₂ 濃度が変動することを観測事実が示しているのです。

この Keeling の報告に対する日本気象学会の公式見解は、Keeling が取り除いた大気中の CO₂ 濃度の長期的な傾向こそが人為的な CO₂ 放出の影響であり、数十年から百年というタイムスケールでは人為的な CO₂ の放出が原因となって大気中の CO₂ 濃度が上昇し、それが大気の温室効果の増大を引き起こし気温が上昇するという原因と結果の逆転が起こると主張しました。しかし彼らの主張が事実であることを示すためには、Keeling が取り除いた CO₂ 濃度の長期傾向と気温変動の因果関係を示すことが必要であり、Keeling のグラフからは彼らの主張を合理的に説明することは不可能でした。彼らはその主張の検証を行うことを行わず、専ら計算機による気象シミュレーションに埋没しています。

3-1-3 気温が CO₂ 濃度の変化速度を変化させる

C.D.Keeling の報告を検証し、更に気温と大気中 CO₂ 濃度の関係を探ることにします。気象学会の公式見解では Keeling が恣意的に取り除いた大気中 CO₂ 濃度の“長期傾向”が問題だとされました。Keeling のグラフからわかるように、世界平均気温偏差と大気中の CO₂ 濃度は数年周期で変動を繰り返しています。大気中 CO₂ 濃度と世界平均気温偏差のデータを同じ時間軸にプロットした図を示します。

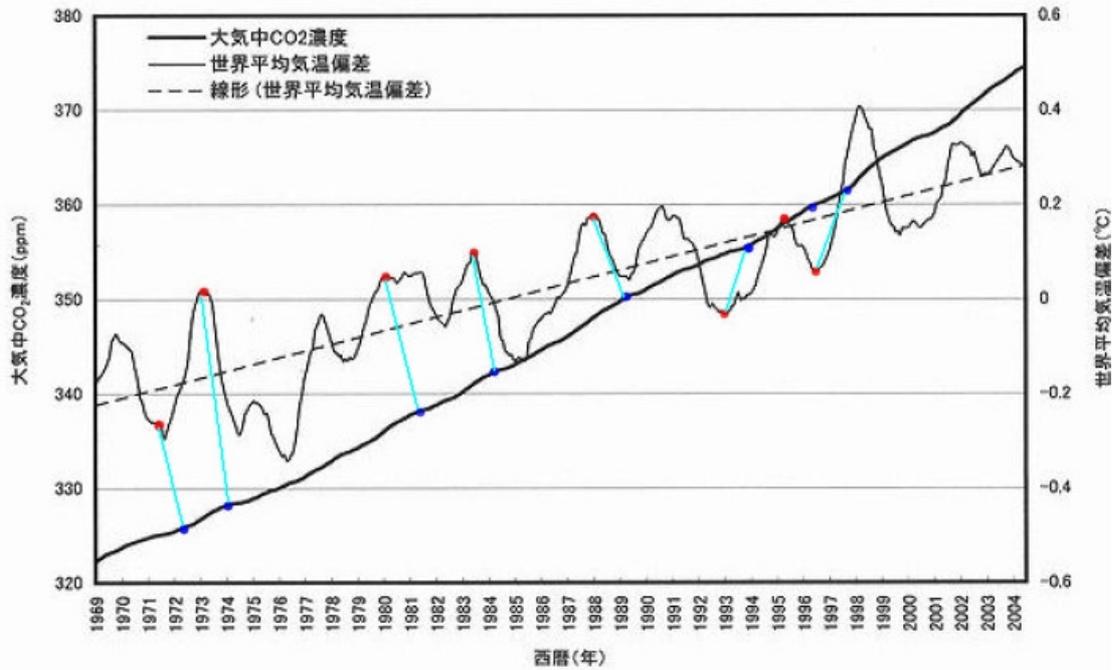


図10 大気中 CO₂ 濃度と世界平均気温偏差

特徴的な点(極値)の対応点を赤と青の点で示します。やはり、長期的な傾向を取り除かないデータにおいても特徴点はまず気温変化に現れ、1~2年程度遅れて大気中の CO₂ 濃度が変動していることがわかります。

しかしこのままでは分かりにくいので、気温変動と大気中 CO₂ 濃度の時間に対する変化率(曲線勾配)を比較することにしました。

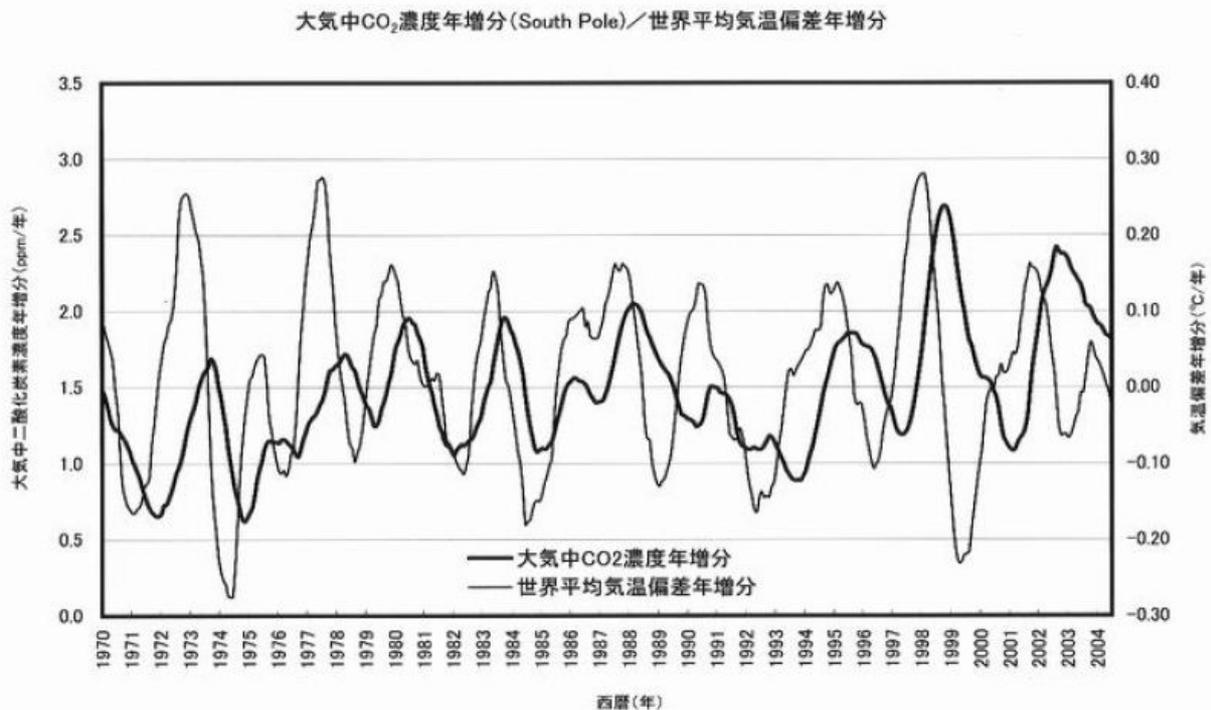


図11 世界平均気温偏差年増分と大気中 CO₂ 濃度年増分

グラフから明らかなように、まず気温が変動し、1～2年程度遅れて大気中のCO₂濃度が変動するのです。このグラフから、気象学会が問題提起した大気中CO₂濃度の長期的な変動傾向を含めても、気温変動が原因となってその結果として大気中のCO₂濃度が変化することが示されました。

気温と大気中のCO₂濃度の2者の関係は、気温変動に伴う海洋からのCO₂放出が大きく関与していると考えられます。参考のために海洋表面温度と大気中CO₂濃度の時間変化率を比較した図を示しておきます。

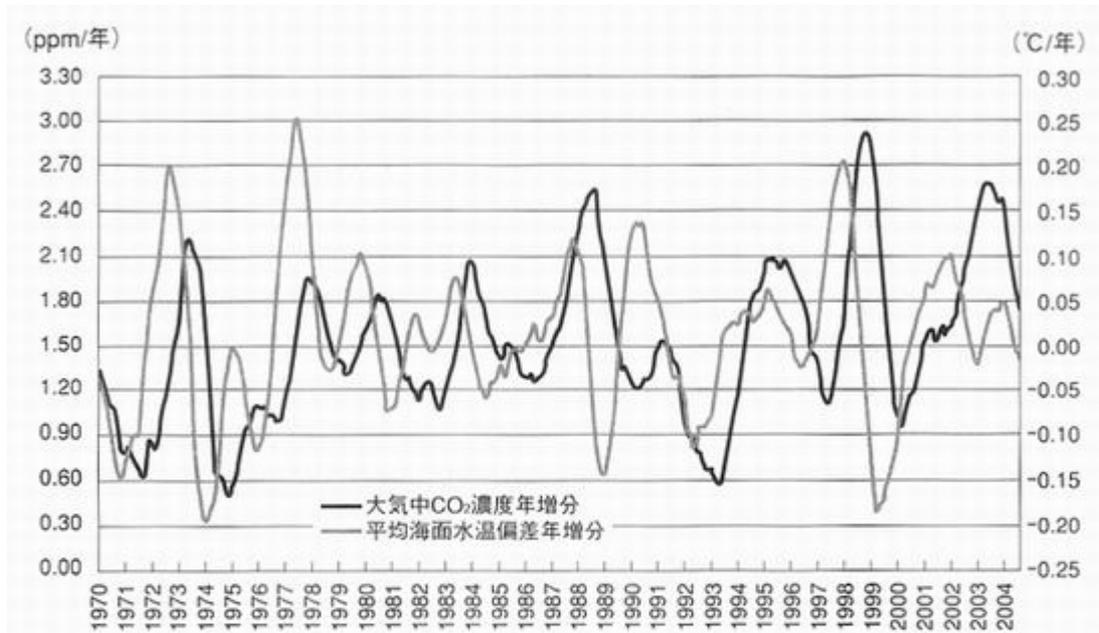


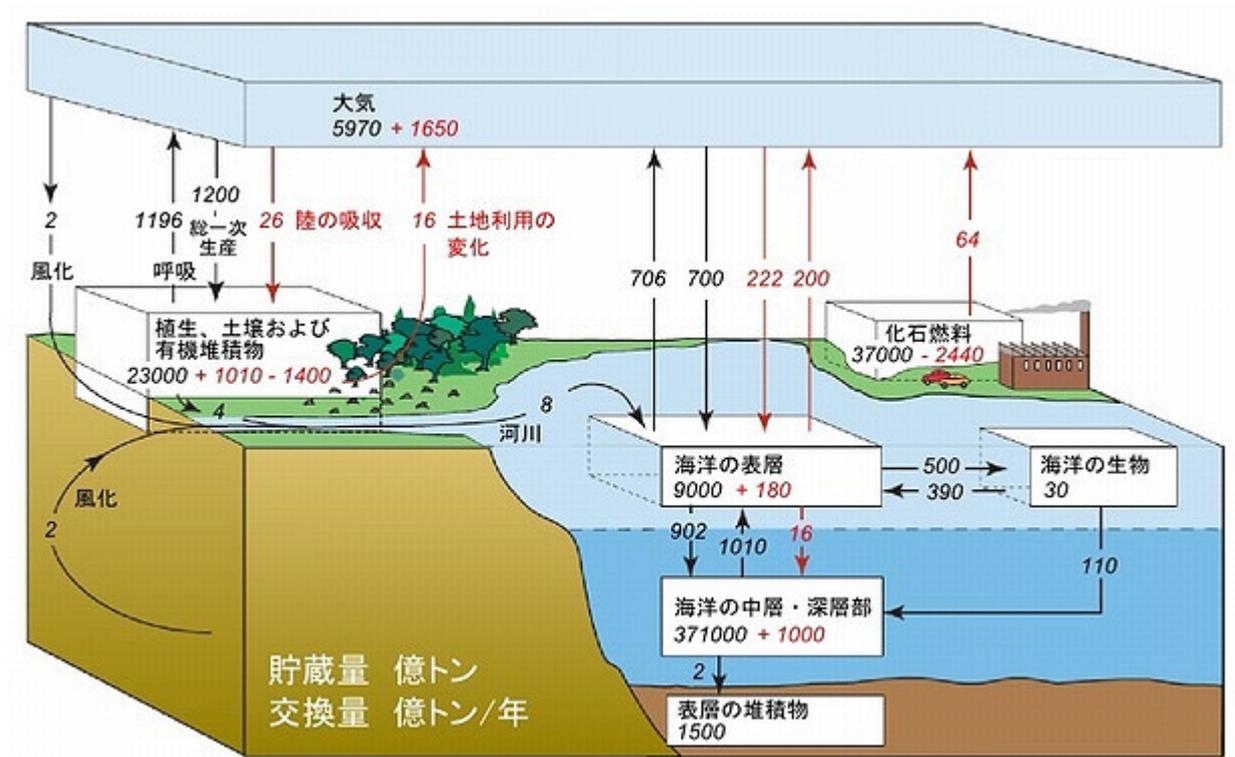
図2.14 ΔCO_2 と全球平均海面水温偏差の変動傾向

海面水温の平年値は1971～2000年の30年間の平均値（気象庁ホームページ「領域平均海面水温偏差の時系列」より）。大気中二酸化炭素濃度の対前年増分 ΔCO_2 はKeelingのデータをもとに、水温偏差と比較するために13カ月移動平均で平滑化している。

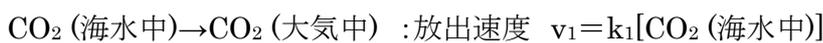
これまでの検討で、気温あるいは海洋の表層水温の変化が大気中のCO₂濃度変動の原因であることはわかりました。では、気温変動からCO₂濃度の変動が発現するまでに1～2年間という比較的長い期間が必要な原因は何なのかを考えることにします。

熱容量の小さい大気の変動が生じてから熱容量の大きな海水温度が変動するのに時間が掛かるからという可能性が考えられましたが、既に見てきたように気温と海洋表層水温はほとんど時間遅れなく同期していることが確認されました。

大気中の CO₂ と海洋表層水中の CO₂ の交換という反応を考えます。まず IPCC2007 年の炭素循環図を示します。



図からわかるように、近年の炭素循環の変化に最も大きな影響を与えているのは海洋における CO₂ 交換量の増加です。海洋と大気の間では、海洋からの CO₂ の放出反応



と、大気中の CO₂ が海洋に吸収される



逆反応が同時に起こっています。

気温と海洋表層水温が上昇することによって、速度係数 k_1 と k_2 が変化すると考えられます。つまり、気温や海洋表層水温の変化は、大気中の CO₂ 濃度を直接変化させるのではなく、CO₂ の放出速度や吸収速度を変化させると考えられるのです。

そこで、世界平均気温偏差そのものと大気中の CO₂ 濃度の時間に対する変化率 (= 反応速度) を比較することにしました。その結果を次の図に示します。

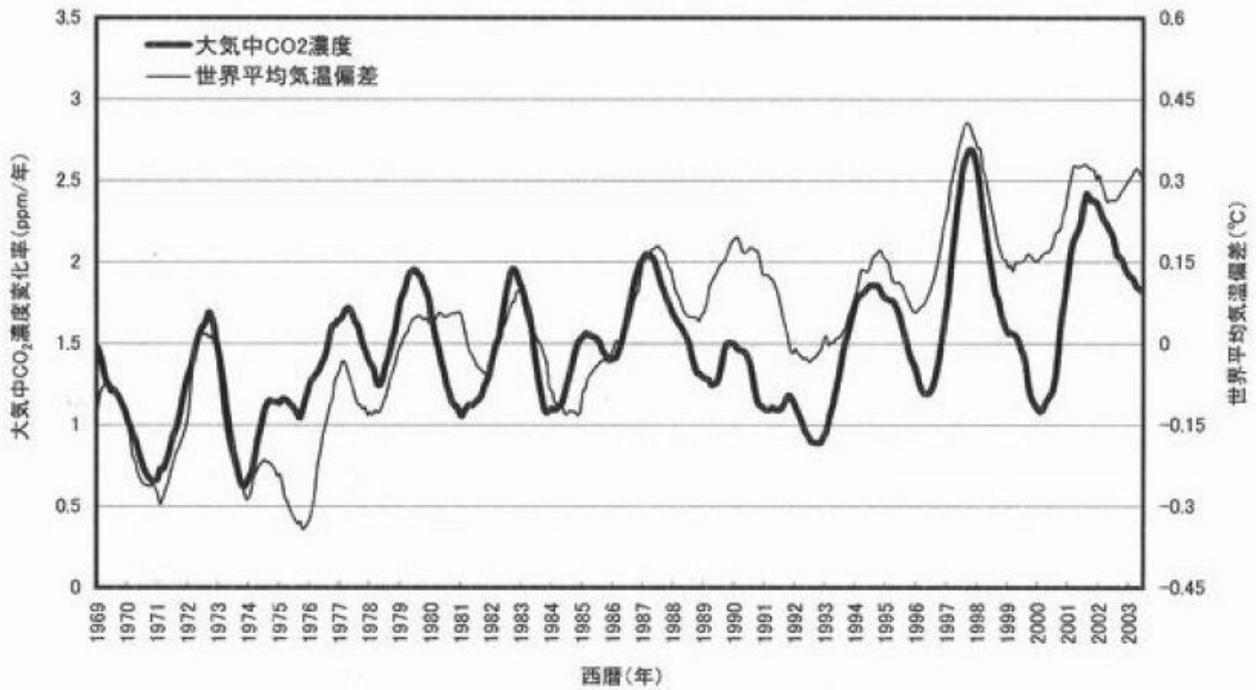
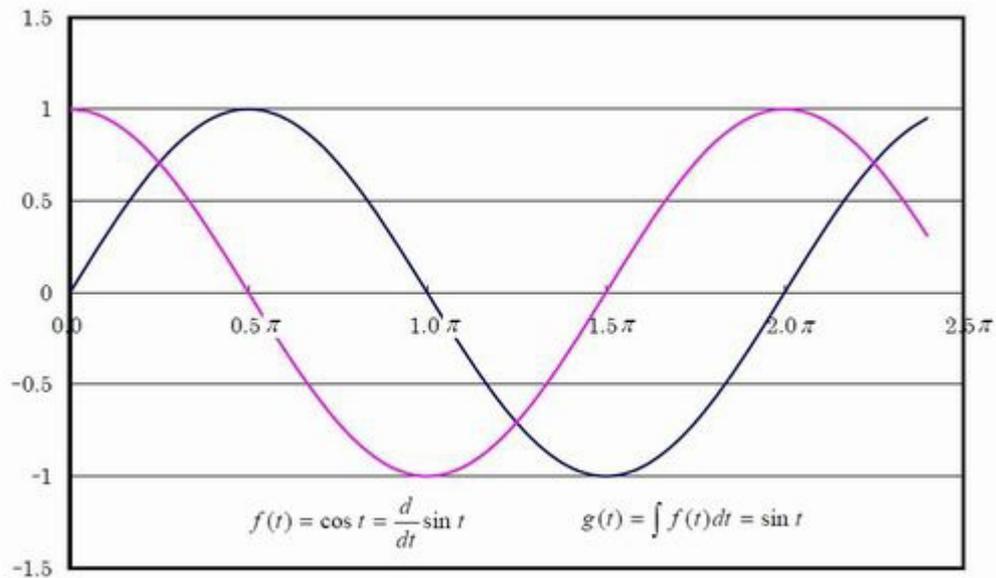


図 12 世界平均気温偏差と大気中 CO₂ 濃度変化率

図からわかるように、世界平均気温偏差と大気中の CO₂ 濃度の時間に対する変化率の極値の発現状況は見事に一致する、つまり気温の変動が CO₂ 濃度の時間変化率と同期することがわかりました。

一般に、周期的に変動する関数を積分することによって、1/4 周期だけ位相が遅れることになります。例えば代表的な周期関数である cos 関数の例を次の図に示します。



大気中の CO₂ 濃度は CO₂ 濃度の時間変化率を時間軸で積分することによって得られますから、変動周期の 1/4 だけ位相が遅れることになっていたのです。

気温変動と大気中の CO₂ 濃度の関係の特性を見るために散布図を示します。

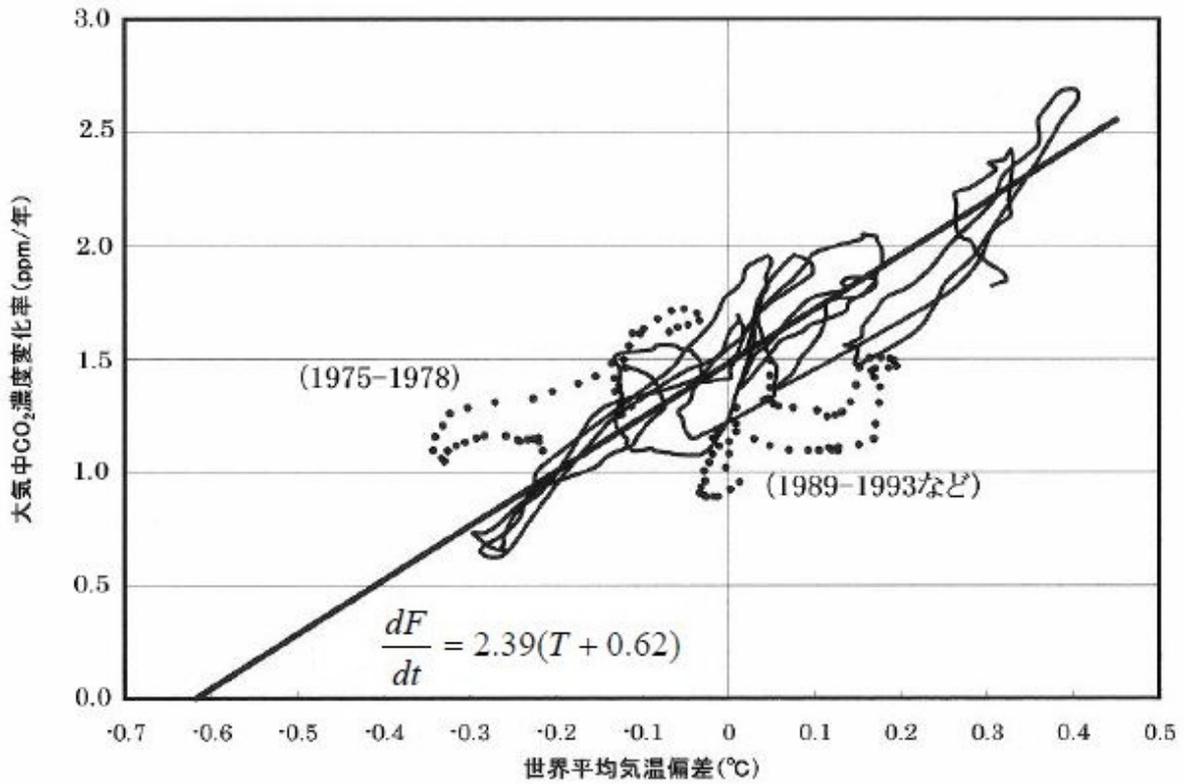


図 13 世界平均気温偏差と大気中 CO₂ 濃度変化率の散布図

散布図の回帰直線は、大気中の CO₂ 濃度を表す関数を F とした場合、その時間変化率と世界平均気温偏差 T の関係を示しています。

$$\frac{dF}{dt} = 2.39T + 1.47 = 2.39(T + 0.62)$$

分析対象とした 1969 年～2003 年の 35 年間の平均気温が、大気中の CO₂ 濃度が平衡する気温偏差 -0.62°C よりも高温で推移したために大気中の CO₂ 濃度が継続的に上昇していたのです。

ここで、散布図の意味を考えておきます。

大気中の CO₂ 濃度を表す関数 F は、気温 T だけでなく、様々な環境要因の関数として、形式的に次のように表すことができます。

$$F = F(T, X_1, X_2, X_3, \dots)$$

T : 世界平均気温偏差

X_1, X_2, X_3, \dots : 大気中 CO₂ 濃度に影響する物理量

T, X_1, X_2, X_3, \dots はすべて時間 t の関数

関数 F は大気中の CO_2 量 Q に比例するので、

$$F(t) = C \times Q(t) \quad \therefore \frac{dF}{dt} = C \frac{dQ}{dt} = C(q_{in} - q_{out}) \quad : C \text{ は定数}$$

関数 F の時間変化率は次のように表すことができます。

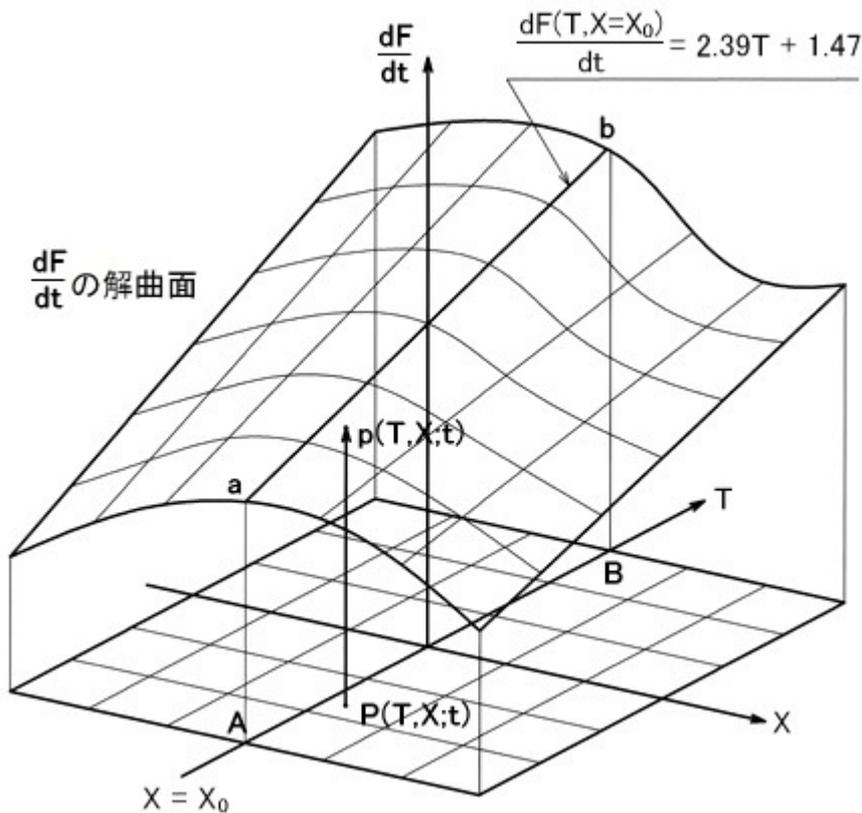
$$\frac{dF}{dt} = \frac{\partial F}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial X_1} \frac{\partial X_1}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial X_2} \frac{\partial X_2}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial X_3} \frac{\partial X_3}{\partial t} + \dots$$

ここでは問題を単純化するために気温以外の変数を X だけとした場合について考えます。この時、 F と F の時間に対する変化率は次のように簡単になります。

$$F = F(T, X)$$

$$\frac{dF}{dt} = \frac{\partial F}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial t}$$

F の時間変化率は T と X の関数として次の図で示す解曲面になります。



散布図の回帰直線は、解曲面と $X = X_0$ という平面の交線を表しています。実際には観測期間中に気温偏差以外の環境要因 X も変化するため、 X - T 平面上の $X \neq X_0$ の点 P に対応する点 p が観測されるために、散布図では直線から外れた点が出現することになります。

世界平均気温偏差の変動と CO₂ 濃度の時間変化率が大きく乖離した部分は、気温 T 以外の環境要因が大きく変化したことを示しています。例えば、1990 年付近の乖離に大きく影響している要素としてフィリピンのピナツボ火山の大噴火が考えられます。

しかし、35 年間の分析対象期間を通して世界平均気温偏差と大気中の CO₂ 濃度の変化率の変動は非常によく同期しており、気温が大気中の CO₂ 濃度変化率の変化に対する主要な原因であることを示しています。

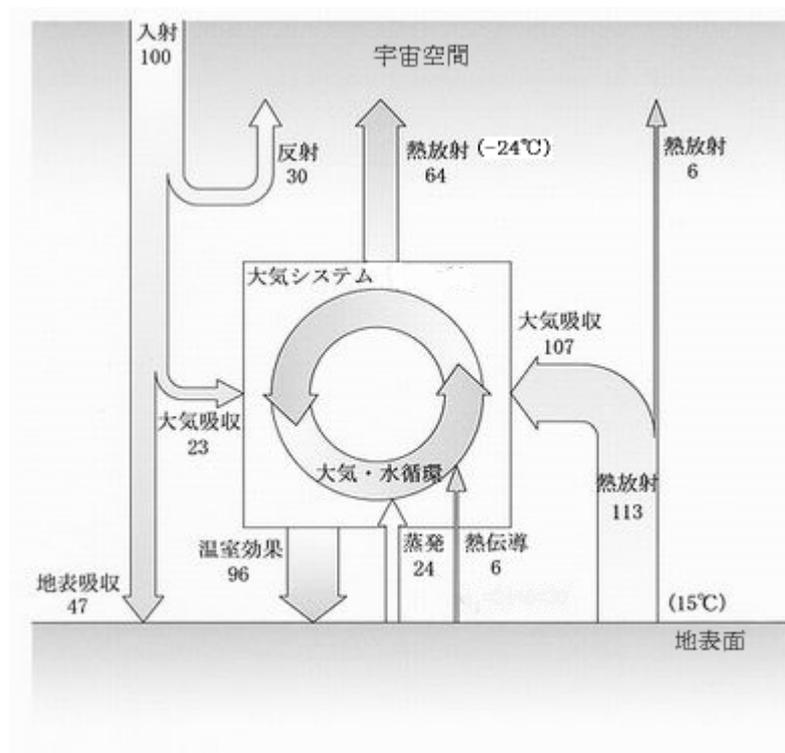
3-2 大気中のエネルギー伝達と温室効果

人為的 CO₂ 地球温暖化仮説では、大気中の CO₂ 濃度の上昇による下層大気の温室効果の増大が近年の気温上昇の主要な原因だとしています。ここでは下層大気システムにおける 3 つのエネルギー伝達の仕組み

- ① 気体分子の衝突によるエネルギー伝達 (伝導)
 - ② 赤外線放射・吸収によるエネルギー伝達 (放射)
 - ③ 気体分子の集合としての大気という圧縮性流体の運動 (対流)
- を示し、温室効果の実体を示します。

3-2-1 下層大気のエネルギー収支

対流圏の大気に対してエネルギー供給を行う機構を図に示します。



上図は、太陽定数の 1/4 である 342W/m² を 100 とした場合の相対的な数値による下層大気のエネルギー収支を示しています。図から、大気システムにエネルギーを供給するチャンネルは 4 つです。

①太陽放射の内の赤外線放射	23 (78.7W/m ²)
②地表面からの蒸発潜熱	24 (82.1W/m ²)
③地表面からの熱伝導	6 (20.5W/m ²)
④地表面からの赤外線放射	107(365.9W/m ²)
合計	160(547.2W/m ²)

こうして供給されたエネルギーは、赤外線放射によって地表面と宇宙空間に放射されます。

①地表面への赤外線放射(温室効果)	96(328.3W/m ²)
②宇宙空間への赤外線放射	64(218.9W/m ²)
合計	160(547.2W/m ²)

3-2-2 大気中のエネルギー移動

1 気圧 0°Cにおいて 1mol の気体の体積は

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

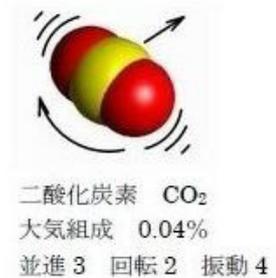
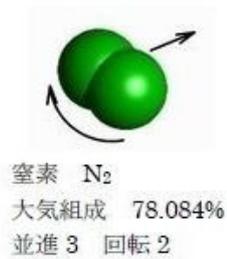
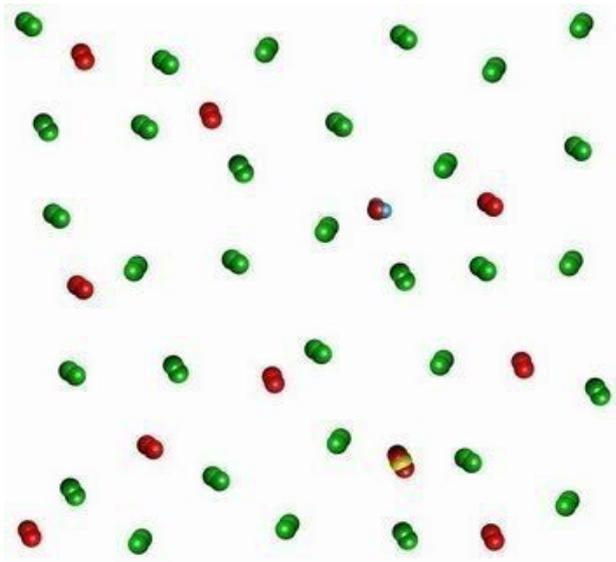
一方、1mol に含まれる気体分子数は 6.02×10^{23} 個/mol です。仮に大気を構成する気体分子が種類に関係なく均等に拡散しているとすれば、

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

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。

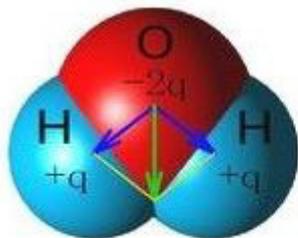
大気を構成する気体分子の2乗平均速度は 500m/s 程度であり、周囲の分子と頻繁に衝突を繰り返しています。下層大気中で気体分子が他の分子に衝突せずに進める平均的な距離は 68nm 程度です。気体分子同士の衝突の時間間隔の平均は 100ps (ピコ秒= $\times 10^{-12}$ 秒) のオーダーであり、1秒間に $1.0 \times 10^{10} = 100$ 億回程度の衝突を繰り返しています(→気体の状態方程式)。

大気を構成する気体分子間では分子衝突と赤外線の放射・吸収(赤外線を放射・吸収することのできる気体分子の場合)によって絶えずエネルギーの再配分が起こっているため、気体分子のとりうるすべての運動モード(並進、回転、振動)に対して偏りなく平均的に1自由度当たり $kT/2$ ($k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$: ボルツマン定数、 T : 気体の絶対温度) のエネルギーが分配されます。これをエネルギーの等分配則と呼び、このような状態を熱力学的に平衡であるといいます(→気体の分子運動論概説)。



下層大気(対流圏大気)の大気組成の概略は窒素 N_2 が 78.1%、酸素 O_2 が 20.9%です(上図のイメージでは CO_2 は実際の 100 倍程度になっています。)。この二種類の気体で大気の 99%を占めています。 N_2 と O_2 は対称構造の無極性の 2 原子分子であり、並進 3 自由度、回転 2 自由度を持っています。下層大気の 99%は赤外線を放射・吸収することはありません。

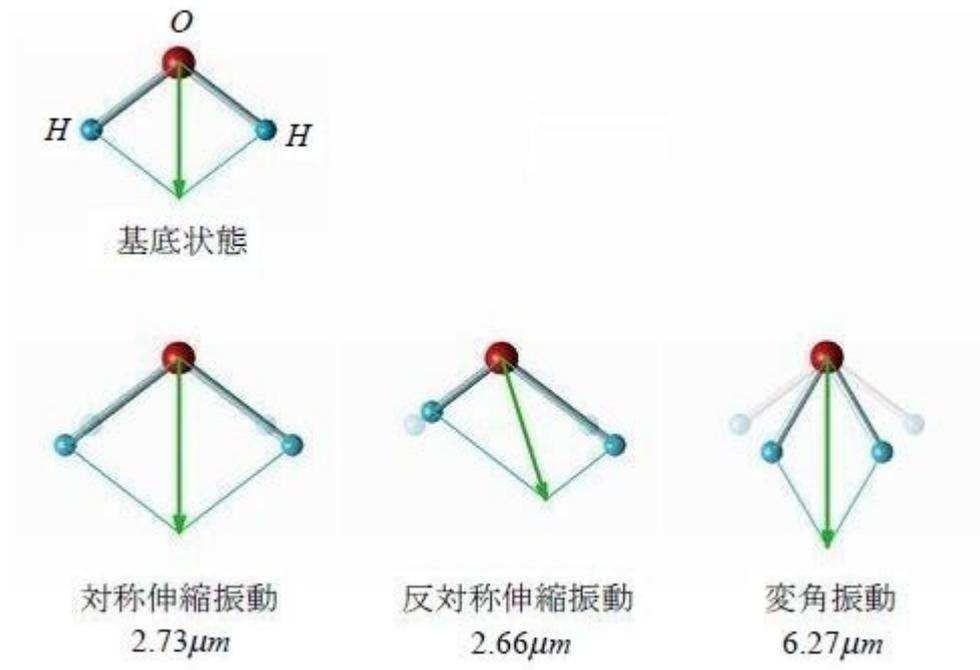
水(水蒸気) H_2O は大気中濃度の変動の大きな気体であるため、通常の大気組成は乾燥大気についての組成を示しています。 H_2O の大気中濃度は数 1000ppm \sim 30000ppm(3%)程度の間で変動しています。 H_2O は屈曲した構造を持つ3原子分子であり永久双極子モーメントを持つ極性分子です。



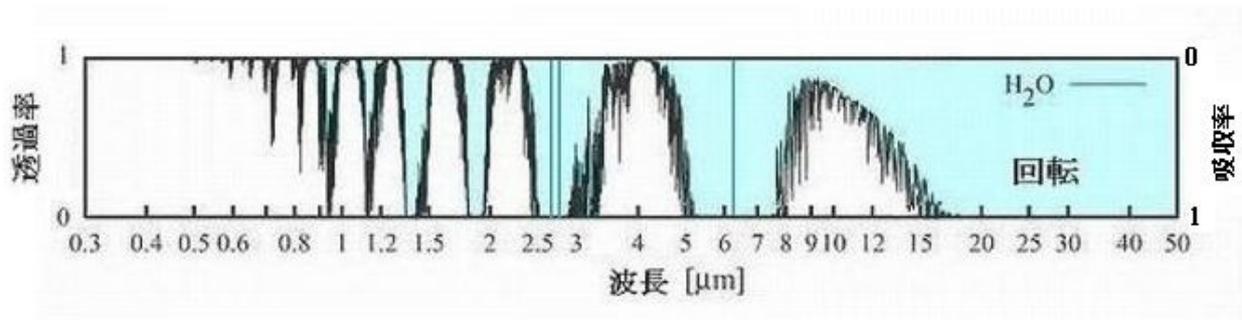
結合角度 104.5° 双極子モーメント $1.85d$

その結果、回転の 2 自由度について赤外線を放射・吸収します。

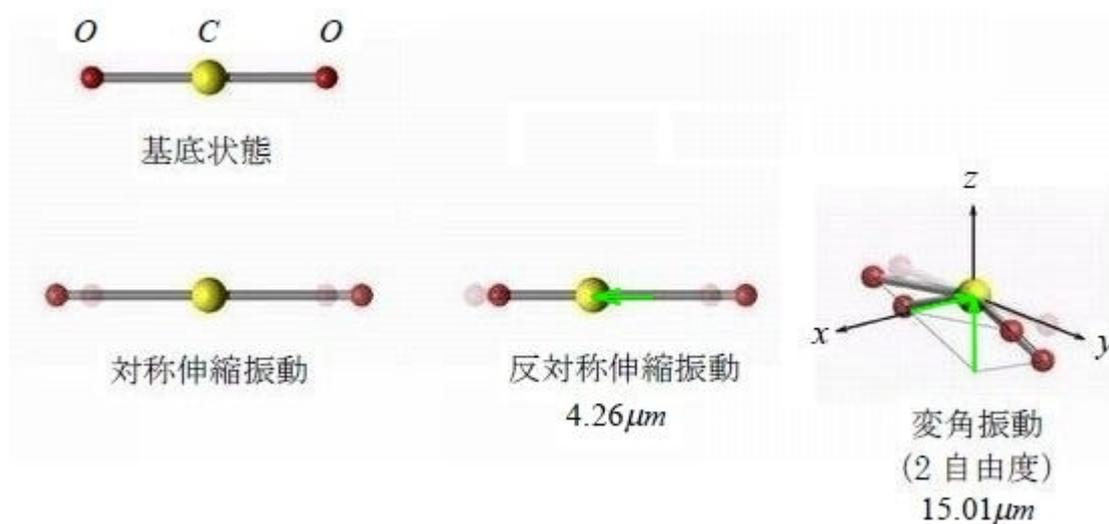
また、振動の3自由度についてすべてで赤外線放射・吸収します(→気体の分子運動と電磁放射)。



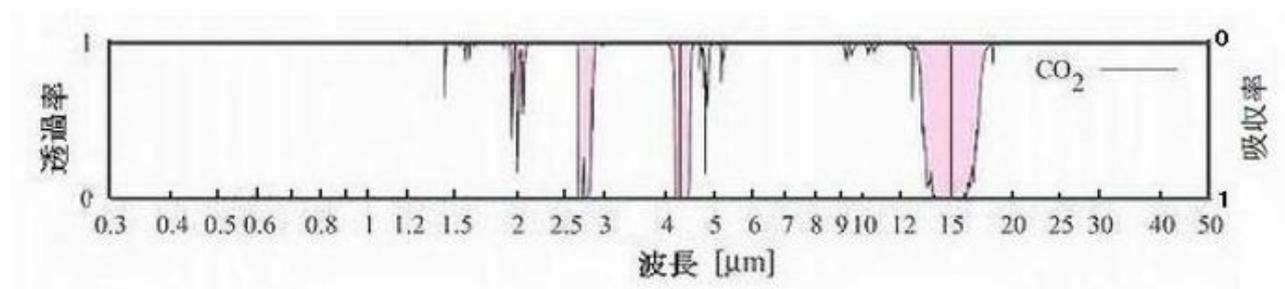
H₂O の地表面放射に対する吸収スペクトルを示します。



二酸化炭素 CO_2 の大気組成は 400ppm (0.04%) 程度です。 CO_2 は対称の直線構造の 3 原子分子であり、無極性分子です。その結果、回転運動では赤外線放射・吸収は起こりません。振動の 4 自由度の内、3 自由度について赤外線を放射・吸収します。



CO_2 の地表面放射に対する吸収スペクトルを示します。



前節で見た通り、大気に供給されるエネルギーによって大気は定常的な温度状態を保っています。その $130/160 = 81.25\%$ は赤外線放射によって供給されています。つまり、大気の数%に過ぎない H_2O と CO_2 が赤外線放射のエネルギーを受け取り、頻繁に起こる分子衝突によって受け取ったエネルギーの大部分が大気の 99% を占める N_2 と O_2 の並進・回転運動に配分されるのです。下層大気の子分子組成から、 H_2O や CO_2 は、 N_2 と O_2 に衝突する確率が圧倒的に高くなります。

エネルギー等分配則から大気を持つ内部エネルギーは大気を構成するすべての分子の運動モードに対して一定の割合で分配されます。 H_2O と CO_2 の赤外線の放射・吸収が生じる運動モードに対しても大気の子温度状態に応じて内部エネルギーが分配されており、温度状態に応じた赤外線を放射します。

3-2-3 大気放射・温室効果・地球の熱収支

永久双極子モーメントを持つ気体分子や振動運動によって双極子モーメントを生じる(赤外活性)気体分子を含む混合気体に照射された赤外線は、気体分子に吸収されることによって透過距離に対して指数関数的に急速に減衰します。

地表面放射は下層大気中で急速に吸収され減衰します。乾燥した透明な大気の「大気の窓」に対応する 8~12 μm 付近の波長帯域を除けば、地表面放射がそのまま宇宙空間に放出されることはありません(→地球大気の熱収支)。

大気に含まれる極性分子や赤外活性を持つ気体(具体的には主に H_2O と CO_2)からの赤外線放射は、気体分子がランダムに並進・回転運動することによってあらゆる方向に等方的に放射されますが、周囲の極性分子や赤外活性を持つ気体に吸収されることで透過距離に対して指数関数的に減衰します。

低い高度の比較的温度の高い大気から放射された赤外線のうちで、周囲の極性分子や赤外活性を持つ気体分子に吸収されずに地表面にまで到達する赤外線を『温室効果』と呼びます。温室効果の大きさは 96(328.3W/m²)程度です。

逆に、対流圏上層において雲頂や大気からの低温赤外線放射の内、大気に吸収されずに宇宙空間に放出される赤外線によって地球は放熱しています。

大気の窓を通過して放射される地表面放射の一部 6(20.52W/m²:地表面放射の 5%程度)と対流圏上層の雲頂や大気からの低温赤外線放射 64(218.88W/m²)によって宇宙空間に放射される赤外線のエネルギーと、反射を除く有効な太陽放射のエネルギー 70(239.4W/m²)が均衡することによって地球の定常的な温度状態が維持されています。

3-2-4 重力場における大気温度の鉛直分布

これまでの議論では、大気の状態を分子運動と内部エネルギーの問題として考えてきました。エネルギーの授受は分子衝突(熱伝導)と赤外線の放射・吸収によって行なわれています。しかし気体分子の集合としての大気は重さを持つ圧縮性流体として振る舞い、地球の重力の影響を受けることになります。

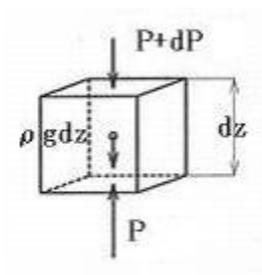
地球大気は主に地表面からエネルギーを受け取り(地表面放射 107、蒸発潜熱 24、熱伝導 6、137/160=86%)加熱されます。大気を構成する分子は高速で運動していますが、平均的には 68nm 進むと隣接する気体分子に衝突してランダムに方向を変える結果、地表面付近の大気塊が下層大気(=対流圏:高度 10km 程度)全体に急速に拡散することではなく、地表面付近で受け取ったエネルギーが下層大気全体に広がるためには膨大な時間がかかります。

大気に供給されるエネルギーが気体分子の内部エネルギーとしての受け渡しだけで拡散するのならば、下層大気中の鉛直温度勾配は現実の大気よりも大きくなり、地表面温度=気温は遥かに高温となり、生物の生息できる環境ではなくなります。

実際の大気は重さを持ち、温度の高い大気ほど密度が小さくなります。地表面で加熱された大気は相対的に密度が小さく大気中を上昇することになります。地表で加熱され、あるいは湿度が高く軽い大気が上昇することの出来る限界の高さが対流圏と成層圏の界面になり、対流圏界面よりも低い下層大気の中では不断に対流が起こっています。対流によって地表面で加熱された大気が塊として対流圏上層に移動すると同時に周囲の大気と混合することで地表面で受け取ったエネルギーが急速に対流圏全体に拡散することになります。

対流圏では大気の大域的な移動があるために厳密には熱力学的に平衡状態ではありませんが、局所的

には熱力学的に平衡として近似することが出来る状態であり、局所熱力学平衡の状態にあると言います。



地球の下層大気＝対流圏大気の鉛直温度分布を決定しているのは大気を構成する気体分子レベルの熱伝導や赤外線放射・吸収現象によるエネルギーの授受ではなく、気体分子の集合としての圧縮性流体としての大気の重力に対する鉛直方向の安定性なのです(→下層大気温度分布)。

乾燥した対流圏大気の鉛直温度分布は次式によって表すことができます。

$$T - T_1 = -\frac{g}{C_p} H \quad \therefore T = T_1 - \frac{g}{C_p} H$$

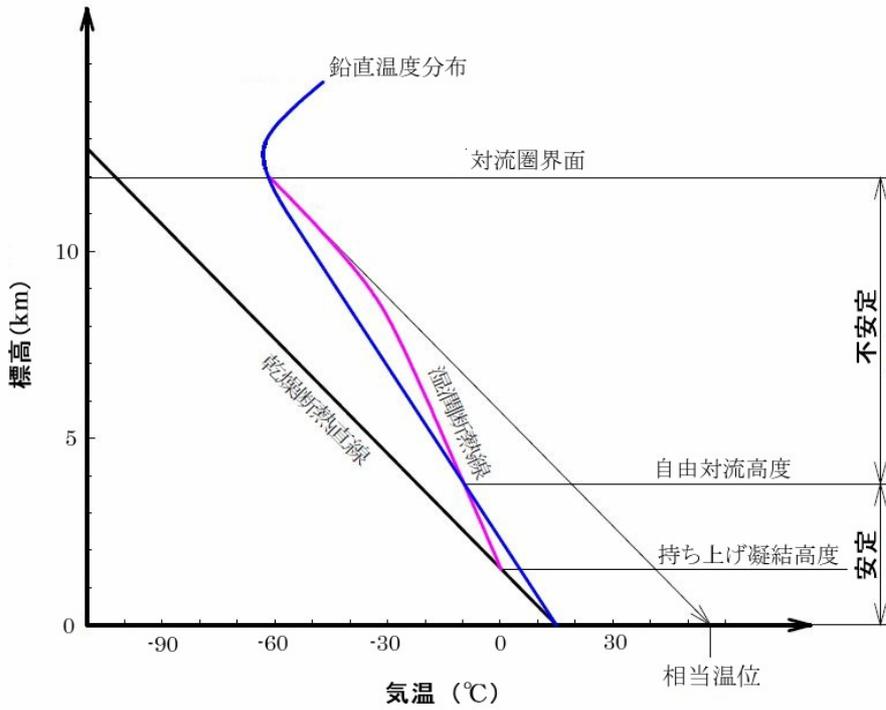
任意の高度 H における温度 T の大気を断熱的に地表面まで下ろした場合(1気圧に減圧した場合)の温度 T_1 を温位と呼びます。上式で表された直線上で表される大気はすべて同じ温位を持つことになります。上式で表される直線を等温位直線と呼びます。

等温位直線の勾配を乾燥断熱(温度)減率と呼びます。地球大気の乾燥温度減率は次の通りです。

$$\frac{g}{C_p} \cong \frac{9.8(m \cdot \text{sec}^{-2})}{1000(m^2 \cdot \text{sec}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})} = 9.8(^{\circ}\text{C}/\text{km})$$

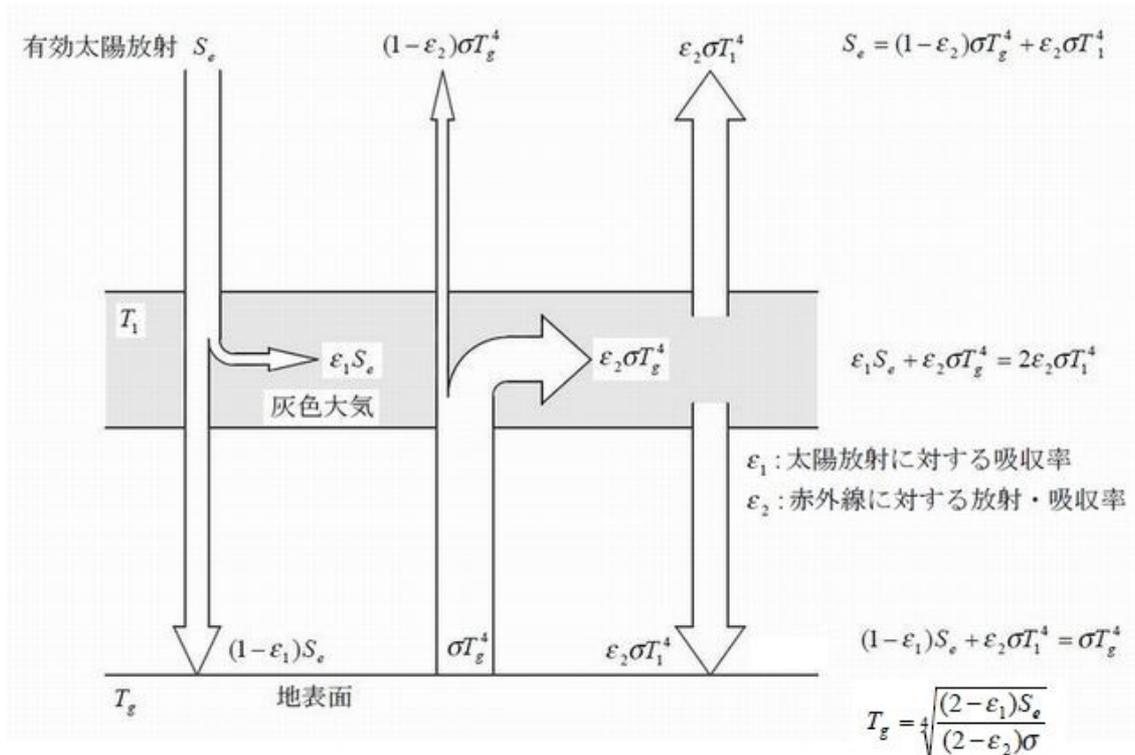
つまり、乾燥した地球の大気であれば、標高が 1km 上がることで気温は 9.8°C 低くなるのです。

実際の対流圏大気は水分子を含むために、水分子の大気中での相変化に伴う凝縮熱の放熱の影響で平均的な鉛直方向の温度勾配は -6.5(°C/km)程度です(下図の青の実線)。



3-2-5 放射平衡モデル

地球の温室効果によって、地球の表面温度が上昇することを示すモデルとして、大気の放射平衡モデルがあります。これは、大気層を灰色大気(太陽放射 [可視光線]は透過し、赤外放射に対しては波長に依らない吸収率をもつ仮想の大気)として、大気の温度を放射過程だけで推定しようとするモデルです。最も単純な一層モデルを示します。



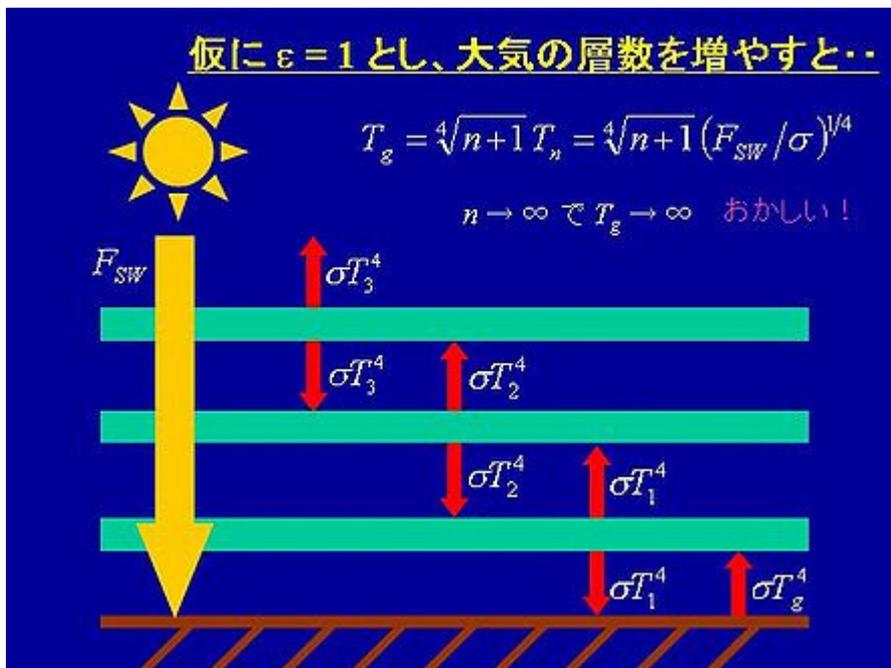
冒頭に示した熱収支の図を参考に $S_e = 342 \times 0.7 = 239 \text{ W/m}^2$ 、 $\epsilon_1 = 23/70 = 0.33$ とします。
 また、 $(1 - \epsilon_2) = 6/113$ から $\epsilon_2 = 0.95$ とすると、地表面温度≒気温 T_g は

$$T_g = \sqrt[4]{\frac{(2 - 0.33) \times 239}{(2 - 0.95) \times 5.67 \times 10^{-8}}} = 286 \text{ (K)}$$

になります。大気層の温度 T_1 は

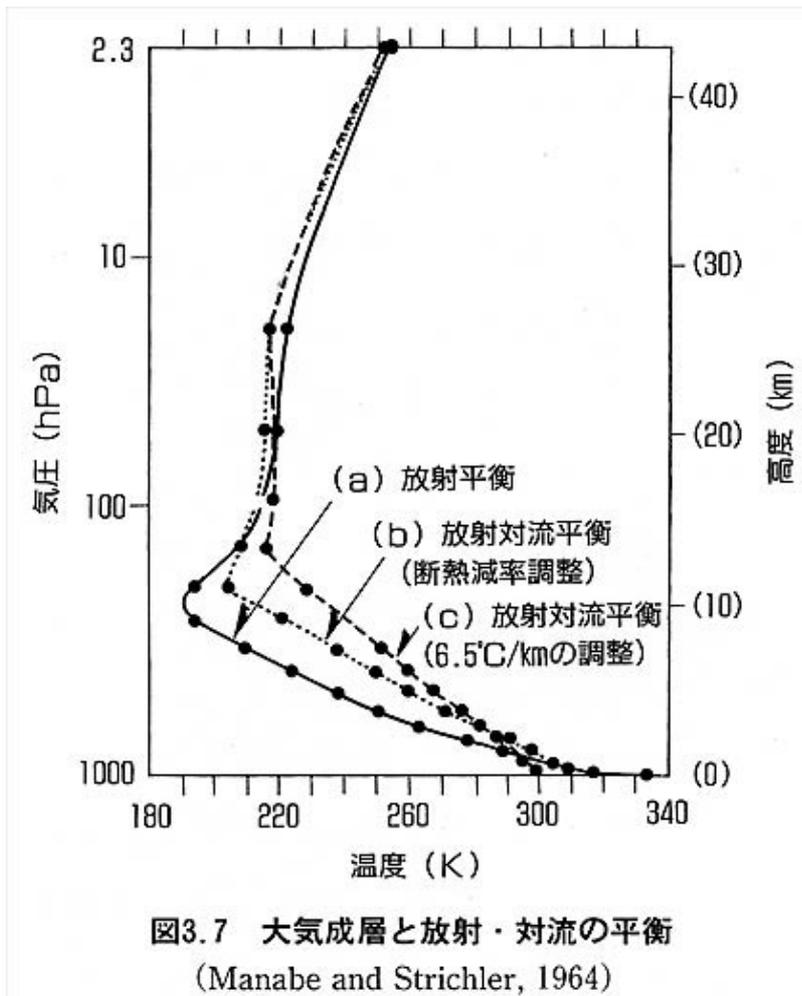
$$T_1 = \sqrt[4]{\frac{\sigma T_g^4 - (1 - \epsilon_1) S_e}{\epsilon_2 \sigma}} = \sqrt[4]{\frac{5.67 \times 10^{-8} \times 286^4 - (1 - 0.33) \times 239}{0.95 \times 5.67 \times 10^{-8}}} = 253 \text{ (K)}$$

一層モデルでは大気中の温度の鉛直分布を表せないことから、実際には大気を複数の層に分割する多層モデルが用いられます。



問題を単純にするために、上の図に示すように、各大気層は太陽放射に対して完全に透明とし、各大気層は赤外線に対して吸収・放出率を 1.0 とします。図からわかるように、層数を多くすればするほど T_g が大きくなります。これは、放射平衡モデルが地表面と大気との蒸発潜熱や熱伝導による熱交換や、大気中における最も重要な熱移動である対流運動を無視した単純なモデル化を行ったからです。

放射平衡モデルで大気温度の鉛直分布をシミュレーションした眞鍋による計算結果を示します。



放射平衡モデル(a)の計算では、下層大気中の鉛直方向の温度勾配は $-17^{\circ}\text{C}/\text{km}$ という現実とはかけ離れた結果を示しました。(b)「断熱減率調整」や(c)「 $6.5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ の調整」は、放射平衡モデルで温度を計算してこれが断熱温度減率である $9.8^{\circ}\text{C}/\text{km}$ や $6.5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ を超えると強制的に温度勾配を調整するというもので、シミュレーションの意味をなしていません。

以上からもわかるように、下層大気(対流圏)の鉛直温度分布を支配しているのは大気の大気による鉛直方向の熱輸送なのです。

3-2-6 大気放射と大気温度の鉛直分布

地球からの赤外線放射と大気温度の鉛直分布構造の満足すべき定性的な条件は、地球の温度状態が(準)定常的であること、=『大気を含む地球という系に供給される反射・散乱を除く有効な太陽放射と地球からの赤外線放射(放射冷却に寄与する地表面放射と雲頂・大気上層からの低温赤外線放射の合計)が均衡すること』です。

この条件に関係する主な要素は、次の三つです。

- ①大気組成(特に水蒸気量)
- ②雲量
- ③対流圏の平均的な温度勾配

ここには含めていませんが、太陽活動の影響が最も重要な要素ですが、太陽放射強度以外についての影響、例えば太陽～地球系の電磁場の変動などについては、完全に解明されているわけではないため、ここでは触れないことにします。太陽放射については太陽定数 1366W/m^2 は一定と考えることにします。

ここで簡単な思考実験を行なってみます。例えば、人為的 CO_2 地球温暖化仮説が主張するように大気の温室効果が増大する場合を考えてみます。

現在の地球大気は、地表面放射 113 の内 107 を大気が捕捉し、6 が放射冷却現象として直接宇宙空間に放射されています。

$$70(\text{有効太陽放射}) = 6(\text{放射冷却}) + 64(\text{低温赤外線放射})$$

現状の地表面温度を $15^\circ\text{C} = 288\text{K}$ 、温度勾配を -6.5K/km 、低温赤外線放射 $218.6\text{W/m}^2 (= 341.5 \times 0.64)$ だとします。 218.6W/m^2 に対する放射平衡温度はステファン・ボルツマンの法則から

$$T = \{218.6 \div (5.67 \times 10^{-8})\}^{1/4} = 249.2\text{K} = -23.8^\circ\text{C}$$

その高度は

$$H = (249.2 - 288) \div (-6.5) = 6.0\text{km}$$

仮に大気の温室効果が増大して、地表面放射を 100% 大気が補足するようになったとします。この場合、放射冷却はゼロになるので

$$70(\text{有効太陽放射}) = 70(\text{低温赤外線放射})$$

となります。つまり、温室効果が増大すれば大気上層からの低温赤外線放射は増大することにならなければなりません。 $341.5 \times 0.7 = 239.1\text{W/m}^2$ に対する放射平衡温度は

$$T = \{239.1 \div (5.67 \times 10^{-8})\}^{1/4} = 254.8\text{K} = -18.2^\circ\text{C}$$

つまり、低温赤外線放射の中心高度が 6.0km で変わらないとすれば、その気温は $-18.2 - (-23.8) = 5.6^\circ\text{C}$ だけ上昇することになります。

下層大気のアverage温度勾配が -6.5°C/km であれば地表面も 5.6°C 上昇することになります。しかし地表面温度が上昇することによって地表面からの蒸発量も増加します。大気中の水蒸気量が増加することで平均温度勾配は -6.5°C/km よりも小さくなります。その結果、地表面の温度上昇は 5.6°C よりも小さくなるでしょう。仮に、地表面温度が 3°C 上昇して 18°C になった場合、地表面放射はステファン・ボルツマンの法則から

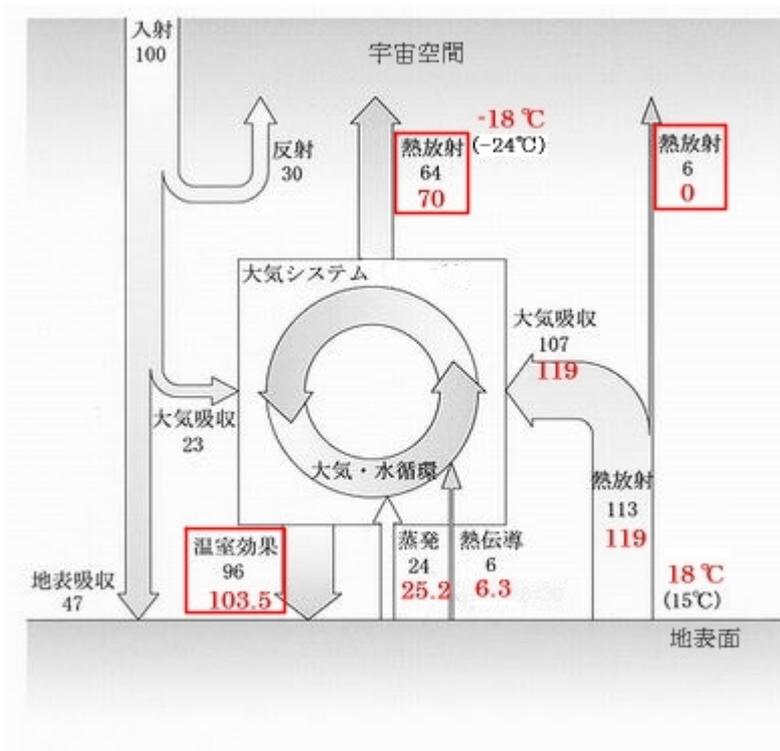
$$\text{地表面放射} = 5.67 \times 10^{-8} \times (273 + 18)^4 = 406.6\text{W/m}^2$$

地表面放射は113から119(≒401.0÷341.5)に増加することになります。大気は地表面放射119をすべて捕捉しますから、その増加量は12(=119-107)です。その他に蒸散潜熱、熱伝導が5%増加すると仮定するとその増加量は(24+6)×5%=1.5です。合計すると大気へのエネルギー供給の増加量は13.5になります。

一方、大気上層からの低温赤外線放射の増加量は6(=70-64)なので、温室効果は

$$96 + (13.5 - 6) = 103.5$$

に増加することになります。



この場合、下層大気の温度勾配は(-18-18)÷6=-6°C/km になります。上図からわかるように、大気の温室効果が増大すると、大気下層から地表面に向かう赤外線放射だけでなく、対流圏上層から宇宙空間に放出される低温赤外線放射も増大することになります。

ここでの思考実験では含めませんでしたでしたが、気温が上昇することによって雲量が増加し、雲は太陽放射を反射するため有効太陽放射を減少させる負のフィードバック効果を持ち、逆に気温の上昇は永久氷河の減少を引き起こすことによって地表面の反射を減少させる正のフィードバック効果を持ちます。

3-3 温室効果の通説を科学する

人為的 CO₂ 地球温暖化仮説は、科学として確立する以前に政治スローガンとなってしまったために非科学的な宣伝が蔓延してしまいました。特に環境省やその外郭団体である

国立環境研究所などが一体となって推し進めた温暖化防止キャンペーンによって、日本国民の間には非科学的な俗説が広まり、科学的な検証作業を妨害するという愚かな状況になっています。

高校教育における温暖化問題の取り上げ方も国策に沿った形で科学ではなく政治スローガンとして導入された結果、非論理的なものになっています。ここでは国による政策的なプロバガンダを取り上げながら科学の視点から検証を試みることにします。

3-3-1 全国地球温暖化防止活動推進センター

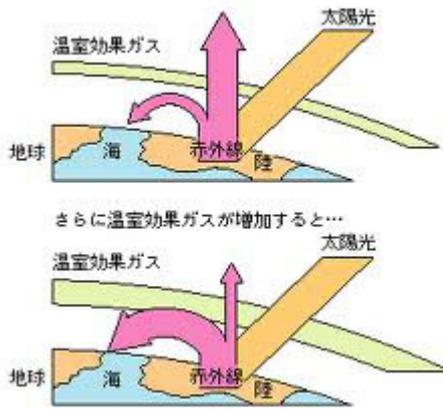
全国地球温暖化防止活動推進センター(以下 JCCCA と略記)は日本における国家による温暖化＝人為的 CO₂ 地球温暖化という政策的なプロバガンダの実行組織です。初期のパンフレットには温暖化の仕組みとして次のような図が掲載され、日本中に類似の説明が広がってしまいました。



現在でもネット上には次のような図が蔓延しています。

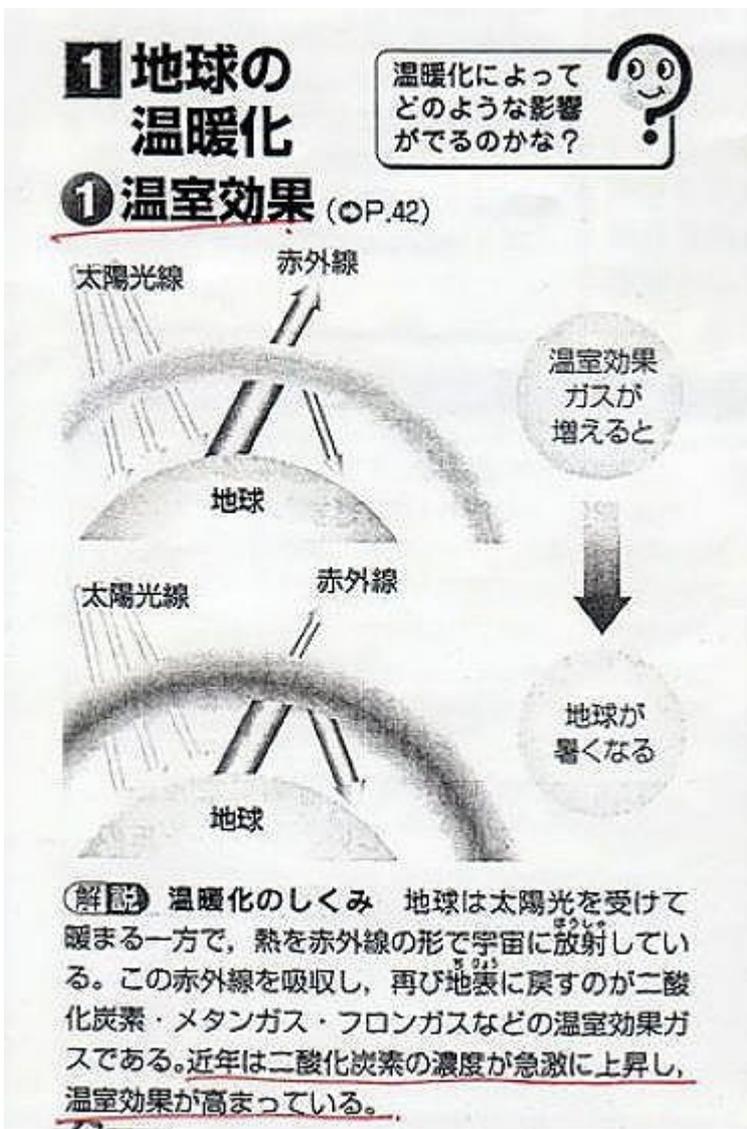


JAF のホームページ



資源エネルギー庁のホームページ

同様に高校の教科書にも次のような図が掲載されています。



JCCCA の図では、人為的 CO₂ 地球温暖化が起こる前の地球では、有効な太陽放射が地球を温め、暖められた地表面が放射する赤外線の一部が温室効果ガスによって吸収されて大気を暖め、その他の大半

の地表面放射はそのまま宇宙空間に放出されているとしています。



第一の問題点。JCCCA の図では太陽の有効放射と地球から宇宙空間に放出される赤外線放射が不平衡であるとして描かれています。地球大気の熱収支や 3-2 大気中のエネルギー伝達と温室効果で示した通り、地球の温度状態が定常的で安定しているのは、熱力学の基本法則であるエネルギー保存則から、地球という系に供給されるエネルギーと地球が放出するエネルギーが均衡しているからです。つまり大前提として満足すべき条件は

有効太陽放射 q_{in} = 地球から宇宙空間に放出される赤外線放射 q_{out}

です。この条件の下で大気の中ではエネルギーが色々な形で混在しており、絶えず相互に転化しています。しかし、個々のエネルギーの転化・移動の過程と有効太陽放射が直接結びついてはなりません。全体として、大気はエネルギーを赤外線放射で少し(= q_{out})づつ宇宙空間に放出しており、有効太陽放射 q_{in} がそれを補っているのです。

仮に $q_{in} > q_{out}$ という状態になると、大気を持つエネルギー Q が増加して大気の温度が上昇する結果、ステファン=ボルツマンの法則に従って地球からの赤外線放射 q_{out} が増加して $q_{in} = q_{out}$ という状態が回復します。逆に $q_{in} < q_{out}$ という状態になると、大気を持つエネルギー Q が減少して大気の温度が低下する結果、地球からの赤外線放射 q_{out} が減少して $q_{in} = q_{out}$ という状態が回復します。

灰色の大気 (太陽放射に対して透明であり、赤外放射に対しては波長に依らない吸収係数をもつ仮想の大気) に対するシミュレーションでは、 q_{out} には最大値 $(q_{out})_{MAX}$ が存在し、 $q_{in} > (q_{out})_{MAX}$ となる q_{in} が与えられた時、大気の温度は限りなく上昇する熱暴走状態になるといわれています。

JCCCA の図では人為的 CO2 地球温暖化が起こった後だけではなく、起こる前においても有効太陽放射で地球に供給されるエネルギー q_{in} よりも地球が放出するエネルギー q_{out} のほうが小さくなっています。この場合、地球大気を持つエネルギー Q の時間 t に対する変化率は

$$\frac{dQ}{dt} = q_{in} - q_{out} > 0, \quad \therefore t \rightarrow \infty \text{ のとき } Q \rightarrow \infty$$

つまり、JCCCA の示すようなエネルギー収支であれば、地球大気の保有するエネルギー量は時間の経過にともなって ∞ に発散する、つまり限りなく気温が上昇する熱暴走状態なのです。これは不合理です。

太陽放射の内、地球を温める有効太陽放射と地球から宇宙空間に放出される低温赤外線放射＝地球放射が釣り合っていることについては、文科省による『高等学校学習指導要領(平成 21 年 3 月版)』の第 5 節理科第 2 款各科目の第 8「地学基礎(62 頁～)」の中でも次のように書かれています。

2 内容

(2) 変動する地球

ウ 大気と海洋

(ア) 地球の熱収支

大気の構造と地球全体の熱収支について理解すること。

…

(中略)

…

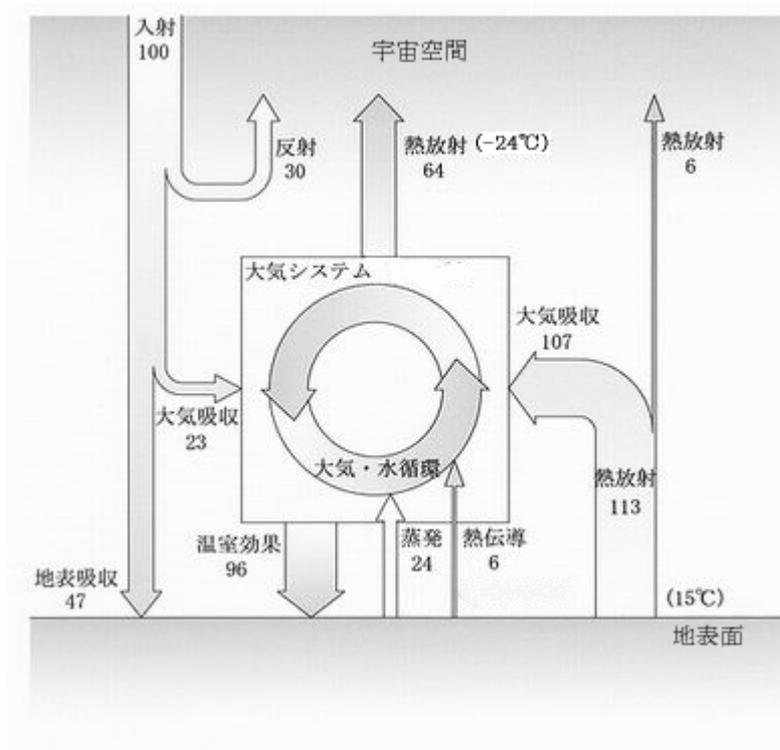
3 内容の取扱い

(2) 内容の範囲や程度については、次の事項に配慮するものとする。

ウの(ア)の「大気の構造」については、気圧や気温の鉛直方向の変化を扱い、大気中で見られる現象にも触れること。「地球全体の熱収支」については、太陽放射の受熱量と地球放射の放熱量が釣り合っていることを扱い、温室効果にも触れること。

(後略)

第二の問題点。JCCCA の図では太陽からの有効放射、地球表面からの赤外線放射、対流圏上層からの赤外線放射を一つの流れとして描いています。しかし対流圏大気上層からの低温赤外線放射は気象条件や大気上層の温度によって決まるのであって、太陽からの有効放射から対流圏下層の温室効果を除いた余剰分が放射されているわけではありません。



上図に示すエネルギー収支からわかるように、地表面に到達する太陽放射 47 よりも地表面放射 113 も温室効果 96 も遥かに大きいのです。地表面からの赤外線放射は地表面の温度によって決まり、大気から地表へ向かう赤外線放射＝温室効果は対流圏下層大気の状態によって決まるのです。また、対流圏上層から宇宙空間への低温赤外線放射は雲の状態や対流圏上層の大気の状態によって決まるのです(→地球大気の大気熱収支、大気中のエネルギー伝達と温室効果)。

大気システムの中では、伝導・放射・対流によって絶えずエネルギーが再分配されており局所熱力学平衡状態になっています(→大気中のエネルギー伝達と温室効果)。大気と地表面の間でも放射・伝導・蒸発潜熱によってエネルギーの交換が行なわれています。こうした大気システム内におけるエネルギーの再配分や大気と地表面のエネルギー交換は太陽からの有効放射とは直接関わりはないのです。

地球には大気という莫大なエネルギー溜めがあり、太陽の有効放射の供給するエネルギーが、主に大気から赤外線放射で宇宙空間に放出され失われるエネルギーと均衡することによって定常的な温度状態が保たれているのです。

地球の表面温度が太陽の有効放射に対する放射平衡温度である 255K よりも 30K 以上も高い原因を、通説では温室効果＝大気中に赤外線を吸収する気体が存在するためだといわれますが、そうではありません。第一義的に重要なのは地球が大気によって包まれており、大気が巨大なエネルギー溜めとなって地球を包んでいるからです。温室効果は、大気というエネルギー溜めに太陽放射を供給する経路を提供しているのです。

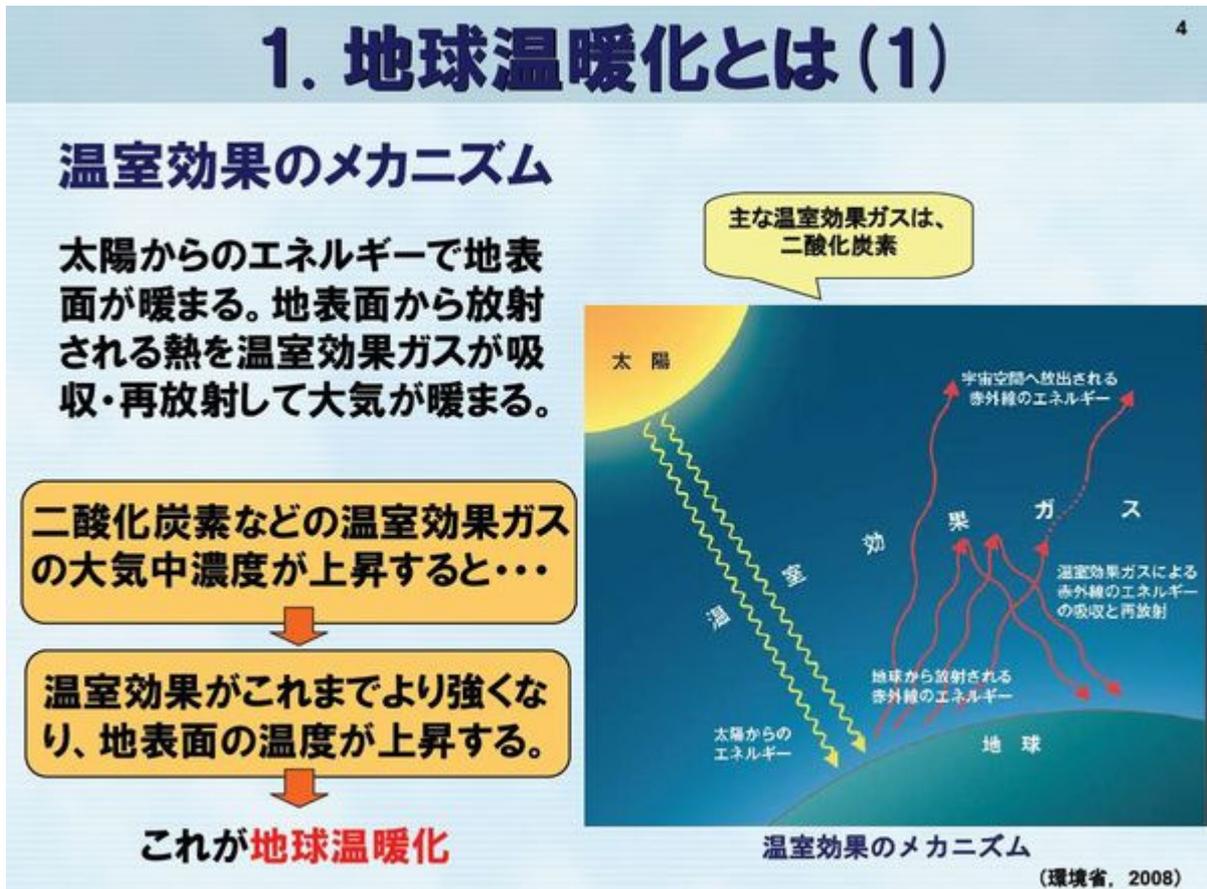
仮に大気が 100%CO₂ で構成されていたとしても、大気の厚さが十分では無ければ溜め込めるエネルギー

一量が少なすぎて十分に地表を暖めることは出来ないのです。例えば、火星の大気はCO₂濃度が95%を超えていますが、大気圧が10hPaに満たないため、平均表面温度は-60°C程度です。

第三の問題点。JCCCA の図では温室効果による気温の上昇によって対流圏上層からの赤外線放射が減少しています。しかし実際には、大気の温室効果の増大＝地表面放射からの放射冷却の減少による地表面温度の上昇によって、対流圏上層の雲頂及び大気からの低温赤外線放射は増加します(→大気中のエネルギー伝達と温室効果)。

3-3-2 大気からの再放射はフィクション

前節で示した、JCCCA や環境省などによって示された初期の温室効果の説明は、あまりにも非科学的なものであったため、JCCCA や環境省の現在のホームページには冒頭の図は掲載されないようになったようです。例えば、「地球温暖化の影響・適応 情報資料集」(2009年2月環境省)では次のような図になっています。



この図では太陽の有効放射と地表面放射が分離して表されています。これは少し改善された点です。線の本数がエネルギー量に対応するものとするれば、太陽の有効放射と赤外線放射が均衡しており、地球の温度状態が定常的である条件を満たしています。

しかし、地球の表面放射と大気からの「再放射」は連続しており、地表面放射が直接宇宙空間に放出さ

れる「放射冷却」で地球が放熱しています。これはまったく非現実的な説明です。以下、環境省の説明にある大気による地表面放射の「再放射」について検討します。

まず、地表面放射を吸収して大気の温度が上昇するという意味を分子運動論的に考えてみます。暖められた地表面は黒体放射で近似できるような連続スペクトルを持つ赤外線放射を放射します(→太陽放射と地球放射)。15°Cの地表面は波長 10 μm 付近にエネルギー密度のピークを持っています。

地表面放射は H₂O の回転スペクトル帯域あるいは主に H₂O と CO₂ の振動運動による赤外活性帯域で吸収されます。しかし、ただ単にこうした温室効果ガスが赤外線を吸収するだけでは大気の温度は変化しません。大気の温度の実体とは、大気の 99%を占める赤外活性のない N₂ と O₂ の並進運動の状態なのです(→気体の状態方程式)。

大気温度の上昇は、地表面放射を吸収して回転運動や振動運動が励起された気体分子(温室効果ガス)のエネルギーが N₂ や O₂ 分子と衝突することによってこれらの分子の並進運動のエネルギーに配分されることによって初めて顕在化するのです。赤外線を吸収した気体分子が、N₂ や O₂ 分子に衝突する以前に「再放射」してしまえば、地表面放射から吸収したエネルギーは大気の並進運動エネルギーに配分されないため、大気温度は上昇しないことになります。

赤外活性を持つ気体分子が赤外線を吸収して振動励起されてから再び赤外線を放射するまでの時間は～ミリ秒($\times 10^{-3}$ 秒)のオーダー、回転励起された気体分子が再び赤外線を放射するまでの時間は～秒のオーダーです。これに対して、対流圏の気体分子が衝突する平均的な時間間隔は 100 ピコ秒(100×10^{-12} 秒 = 1×10^{-10} 秒)のオーダーです(→気体の状態方程式)。つまり、赤外活性気体が再放射するまでに、平均的に気体分子と1千万回(10^7 回)衝突を繰り返すことになります。実質的には地表面放射を吸収した温室効果ガスがそのエネルギーを赤外線の形で再放射することはないのです。

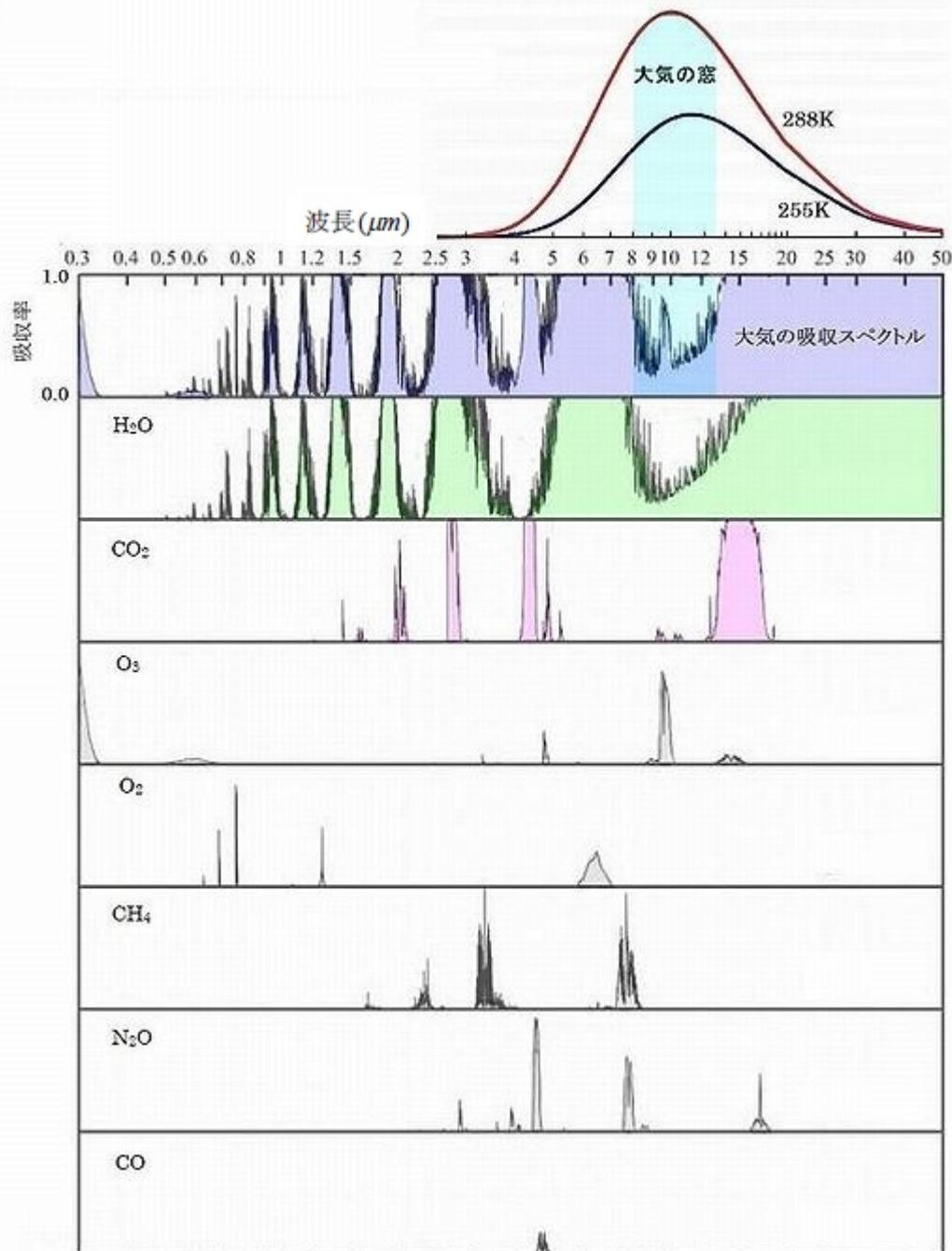
対流圏大気のように比較的分子密度の高い気体は熱力学的に平衡状態にあるとみなすことができます。この場合、気体分子のとり得る全ての運動モードに対して温度状態に応じて一定のエネルギーが分配されます。温室効果ガスの赤外線を放射する運動モードに対しても温度状態に応じてエネルギーが分配されています。温室効果ガスはその温度状態に応じた赤外線を定常的に放射します(→ステファン=ボルツマンの法則)。

大気からの赤外線放射とは大気の温度によって決まる温室効果ガスの内部エネルギーの状態によって決まるのであって、地表面放射とは直接的な関係はないのです。

3-3-3 CO₂濃度の上昇と温室効果

標準的な人為的 CO₂地球温暖化仮説では、大気中の CO₂濃度の上昇によって大気の温室効果が増大することで気温が上昇すると説明されています。ここで言う温室効果とは、大気の地表面放射に対する吸収率と考えられます。

気体分子による赤外線の吸収は、気体分子の回転運動あるいは振動運動の周波数に関連しています(→気体の分子運動と電磁放射)。気体分子の吸収スペクトルは気体分子の種類ごとに異なった分布を持ちます。下層大気的主要な気体分子の吸収スペクトルの分布を下図に示します。



大気中の主要な温室効果ガスの合計の吸収スペクトルと各分子ごとの吸収スペクトルを比較すると、地球大気の温室効果の大部分は水蒸気 H_2O によるものであることがわかります。

地表面放射のスペクトル(288K)に対して CO_2 の主要な吸収スペクトルは $15\mu\text{m}$ と $4.2\mu\text{m}$ 付近です。既にこの帯域の地表面放射はほとんど吸収されています。

地表面放射に対して比較的透明度の高い $8\sim 12\mu\text{m}$ 付近の帯域を大気の窓と呼びます。図に示す晴天日の大気の吸収スペクトルでは大気の窓領域からかなり大量の地表面放射が直接宇宙空間に放射されているように見えます。実際には、晴天日でも空が白っぽく見えるような大気中の水蒸気量が多い場合や雲がある場合には大気の窓は事実上閉じており、地表面放射は大気に完全に捕捉されています。

ところが、大気中の水蒸気量が少なく大気の透明度が高い状況では大気の窓から多くの地表面放射が

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。大気の温室効果を増加させるためには大気の窓領域に吸収スペクトルを持つ気体分子の大気中濃度が増加することで放射冷却現象を抑制することが必要です。しかし、 $15\mu\text{m}$ と $4.2\mu\text{m}$ 付近に吸収スペクトルを持つ CO_2 の大気中濃度がいくら高くなっても大気の窓領域の地表面放射に対する吸収率が増加することはありません。 CO_2 濃度が増加しても大気の温室効果が顕著に大きくなることはありません。

3-3-4 大気循環を無視した国立環境研の驚愕の温暖化理論

前節で示した通り、大気中の CO_2 濃度が上昇しても大気の温室効果が増大することはありません。しかし、 CO_2 地球温暖化を擁護しなければならない国立環境研究所によって、 CO_2 濃度が上昇することでいくらかも気温が上昇するという解説が一時期ネット上に公開されました。国立環境研究所江守正多の解説を紹介します。



二酸化炭素が増えると地球が温暖化するというはっきりした証拠はあるのですか。



私が答えます！

地球環境研究センター
温暖化リスク評価研究室長
江守 正多



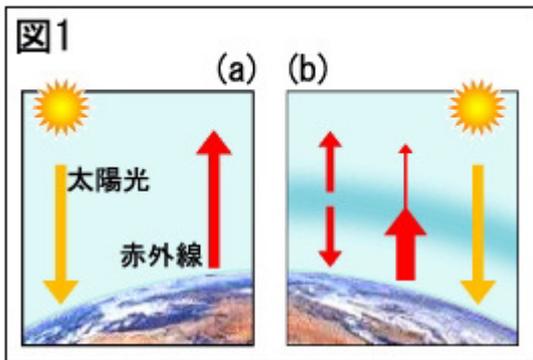
将来の温暖化とまったく同じ状況は過去になかったわけですから、裁判における証拠のような、完全に実証的な意味での証拠はありません。しかし、はっきりした「物理学的な根拠」ならあります。そして、その根拠をわかりやすく示すいくつかの証拠もあげることができます。

温室効果が地表をあたためることの「証拠」

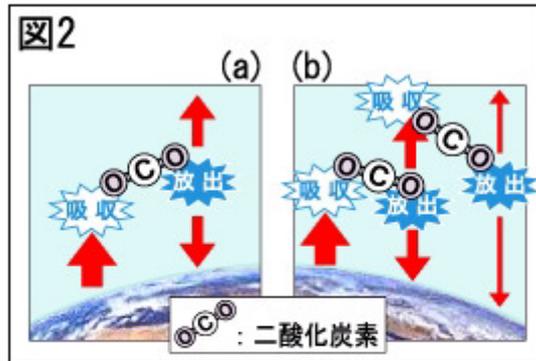
まず、地球の地表付近の温度はどのように決まっているのでしょうか。一般に、物体は、その温度が高いほどたくさんのエネルギーを赤外線として放出します。そして、地表の温度は、地表がうけとるエネルギーとちょうど同じだけのエネルギーを放出するような温度に決まっています^(註 1)。なぜなら、もしも地表の温度がそれより高ければ、放出するエネルギーがうけとるエネルギーを上回るので、地表が冷えて、結局、エネルギーの出入りがつりあう温度におちつくはずだからです。地表の温度がそれより低かった場合も同様です。

さて、宇宙からみると、地球は太陽からエネルギーをうけとり、それとほぼ同じだけのエネルギーの赤外線を宇宙に放出しています(図 1)。もしも地球の大気に「温室効果」がなかったら、地表は太陽からのエネルギーのみをうけとり、それとつりあうエネルギーを放出します(図 1a)。このとき、地表付近の平均気温はおよそ -18°C になることが、基本的な物理法則から計算できます^(註 2)。しかし、現実の地球の大気には温室効果があることがわかっています。すなわち、地表から放出された赤外線の一部が大気によって吸収されるとともに、大気から地表にむけて赤外線が放出されます。つまり、地表は太陽からのエネルギーと大気からのエネルギーの両方をうけとります(図 1b)。この効果によって、現実の地表付近の平均気温はおよそ 15°C になっています。したがって、実際に地球の気温が -18°C ではなく 15°C であることが、大気の温室効

果が地球をあたためることの「証拠」といえるでしょう。



(a)もしも温室効果がなかったら地表は太陽エネルギーのみをうけとる(矢印の線の太さがエネルギーの量を表す)
(b)実際は温室効果があるので地表は大気からのエネルギーもうけとる



(a)二酸化炭素分子は、赤外線を吸収するだけでなく放出する
(b)赤外線を吸収・放出する二酸化炭素分子の量が増えれば、地表に届く赤外線は増える

二酸化炭素が増えると温室効果が増えることの「証拠」

ところで、大気中における赤外線の吸収、放出の主役は、大気の主成分である窒素や酸素ではなく、水蒸気^(注3)や二酸化炭素などの微量な気体の分子です。赤外線は「電磁波」の一種ですが、一般に、分子は、その種類に応じて特定の波長の電磁波を吸収、放出することが、物理学的によくわかっています。身近な例としては、電子レンジの中の食品があたまるのは、赤外線と同様に電磁波の一種であるマイクロ波が電子レンジの中につくりだされ、これが食品中の水分子によって吸収されるためです。

ここで、つぎのような疑問がわくかもしれません。「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大気に一度吸収されてしまったら、それ以上二酸化炭素が増えても温室効果は増えないのではないだろうか？」これはもっともな疑問であり、きちんと答えておく必要があります。実は、現在の地球の状態から二酸化炭素が増えると、まだまだ赤外線の吸収が増えることがわかっています。しかし、そのくわしい説明は難しい物理の話になりますのでここでは省略し、もうひとつの重要な点を説明しておきましょう。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^(注4)、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。

(傍線 近藤)

「実際にどれだけ温暖化するか？」には不確かさがある

このように「二酸化炭素が増えると温暖化する」ことの根拠ははっきりしています。ただし、以上の説明は、二酸化炭素以外の要因が温暖化を、少なくとも部分的に、打ち消す可能性を否定するものではありません。たとえば、大きな火山が噴火すれば、火山ガスから生成するエアロゾル(大気中の微粒子)が日射を反射するため温暖化は一時的に抑制されますが、火山の噴火は予測不可能です。また、温暖化にともない雲が変化するなどの「フィードバック」が、現在の科学ではまだ完全には理解されていません。したがって、何らかのフィードバックにより温暖化が小さめにおさえられる可能性は否定できません。これらの要因があるため、「実際にどれだけ温暖化するか」の予測には不確かさがあることに注意しておきましょう。かといって、何らかのフィードバックにより温暖化が大きく加速される可能性も同様に否定できませんので、予測に不確かさがあることは、決して温暖化を過小評価してよいことを意味しません。

(注1) 地表からは赤外線以外にも熱や水蒸気の形でエネルギーが放出されます(顕熱、潜熱とよばれます)が、ここではそのくわしい説明は省略します。これらを考えに入れたとしても、地表温度が高いほどたくさんエネルギーが放出されます。

(注2) 簡単化のため、地表から放出するエネルギーをすべて赤外線とした場合の計算値です。

(注3) 水蒸気の役割についての説明は別の機会にゆずりますが、水蒸気存在を考えに入れても、今回の説明の内容に本質的な影響はありません。

(注4) 金星は地球より太陽に近いですが、太陽のエネルギーのおよそ 8 割が雲などによって反射されてしまうので(地球の場合はおよそ 3 割)、温室効果がなかった場合の温度はこのように地球よりも低くなります。

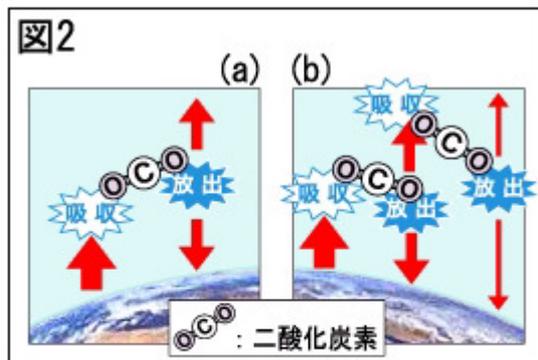
小倉義光. 一般気象学(第 5 章「大気における放射」). 東京大学出版会
柴田清孝. 光の気象学. 朝倉書店(こちらはかなり専門的です)

この江守の解説は、はじめから最後まで間違いだらけですが、二点についてだけコメントすることにします。

①CO₂濃度が上昇すればいくらでも温室効果が増大するか？

この問題は既に前節で示した通り、大気中の CO₂濃度の上昇は大気の温室効果の上昇には結びつきません。江守は次のように述べています『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。』。おそらく、江守の主張は灰色の多層大気に対する放射平衡モデルの特性である、層数を多くして放射・吸収を繰り返すほど地表面温度が上昇することを分子レベルに持ち込んだものだと考えられます(→3-2 大気中のエネルギー伝達と温室効果)。

三つの誤りを指摘しておきます。



(a)二酸化炭素分子は、赤外線を吸収するだけでなく放出する

(b)赤外線を吸収・放出する二酸化炭素分子の量が増えれば、地表に届く赤外線は増える

第一に、既に示した通り地表面放射を吸収した CO_2 は再放射する以前に分子衝突で励起されたエネルギーを周辺の気体分子に分配するために実際には再放射することはありません。

第二に、仮に再放射が可能だとして、江守は CO_2 の放射・吸収が繰り返されることによって地表面方向に向かう放射線量が増えると言いたいようですが、大気の温度状態を決めるのは放射強度であって放射・吸収の繰り返し回数分だけ積算した放射線量ではありません。図 2(b)では一次的に地表面放射を受け取った CO_2 と、その CO_2 からの放射を二次的に受け取った CO_2 の地表面方向への放射にはタイムラグ(ミリ秒オーダー)があるため放射強度(=単位時間あたりの放射線量)が強くなることはありません。また、温室効果ガスからの赤外線放射はあらゆる方向に対して等方的に放射されるため、地表面方向の放射だけが增加することはありません。

第三に、地表面放射に対する一次的な吸収量に変化せずに地表付近の大気温度が高くなるとすれば、対流圏下層の温度勾配が大きくなり大気は不安定となり直ちに重力的な安定性を回復するために対流が起こるので地表面付近の大気の温度上昇は解消されます。江守の主張は移動しない大気の放射過程という非現実的な仮定のもとでのフィクションに過ぎません。

②金星の地表面温度が高い理由は気圧

江守は CO_2 濃度の増加による温度上昇の実例として金星をあげています。

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。

断熱変化に対するポアソンの法則と気体の状態方程式から次の関係が成り立ちます(→気体の状態方程式)。

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

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 CO₂ が 100% で構成されているものとし、比熱比 $\gamma=1.30$ とします。

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

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。

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

つまり、金星の表面温度が高温なのは、分厚い CO₂ 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、CO₂ の温室効果とはまったく関係ないのです。

次に、参考のために火星の平均表面温度を推定しておきます。

基本的な物理量

- 太陽との距離 227,936,640km (1.52368AU)
- 平均太陽放射強度 $342\text{W/m}^2 \div 1.523682 = 147.3\text{ W/m}^2$
- 反射率 25%

以上から火星表面の放射平衡温度をステファン・ボルツマンの式から求めると次の通りです。

$$147.3 \times (1 - 0.25) = 5.67 \times 10^{-8} \times T^4$$
$$\therefore T = 210.1\text{K} = -62.9^{\circ}\text{C}$$

火星の表面温度は 133~293K、平均で 210K 程度といわれるので、この値は妥当な推定値です。火星大気は二酸化炭素が 95.32% ですが、火星重力が小さいために、大気は極めて希薄で表面大気圧は 7~9hPa 程度であり、地球の 1/100 以下です。そのため、火星の表面温度は放射平衡温度に等しく、火星大気による“温室効果”ないし保温効果はほとんど無視することが出来ます。

火星も金星もその大気組成は 90% 以上が二酸化炭素ですが、表面温度はまったく異なります。この例でもわかるように、一般に惑星の表面温度は、大気組成ではなく大気の厚さあるいは惑星表面大気圧によって支配されているのです。

以上の通り、惑星の表面温度は惑星表面の大気圧によって規定されるのであって、大気に占める CO₂ 濃度には関係ないのです。国立環境研究所の江守正多の解説は、おそらく、あまりにも非科学的で誤りが多いために、削除されたものと思われます。