

図解 Keeling のグラフ解釈に対する考察

HP 管理者 近藤邦明

0. はじめに

世界的に人為的 CO₂ 地球温暖化仮説が正しいものとして、温暖化対策と称して石油燃料の燃焼を抑制することで大気中の CO₂ 濃度を削減して温暖化を食い止めようという政策が始められようとしています。もとより、希少有用資源である石油を始めとする化石燃料の浪費を抑えることには異存はありませんが、それが温暖化対策となると多くの問題を含んでいます。

人間の社会的な対応としてのこうした CO₂ 排出量削減という温暖化対策が有効であるためには、第一に確認しておかなくてはならないことは、『近年観測されている大気中 CO₂ 濃度上昇の主因が人為的な石油燃料の燃焼による CO₂ 排出による』か、否かです。

本稿は、大気中 CO₂ 濃度の連続精密観測を行っている Keeling の観測結果からの報告を正しく理解することを目的にします。その内容は二つです。

第一は、前述の通り、『近年観測されている大気中 CO₂ 濃度上昇の主因が人為的な石油燃料の燃焼による CO₂ 排出による』か、否かを明らかにすることです。

そして第二に、観測事実から大気中 CO₂ 濃度と気温の変動の因果関係として、CO₂ 地球温暖化仮説が主張するように、大気中 CO₂ 濃度の増加が原因となって気温が上昇するという事実があるのかどうかを確認することです。

1. CO₂ 濃度上昇の原因は石油の燃焼か？

1-1 対流圏大気の性状

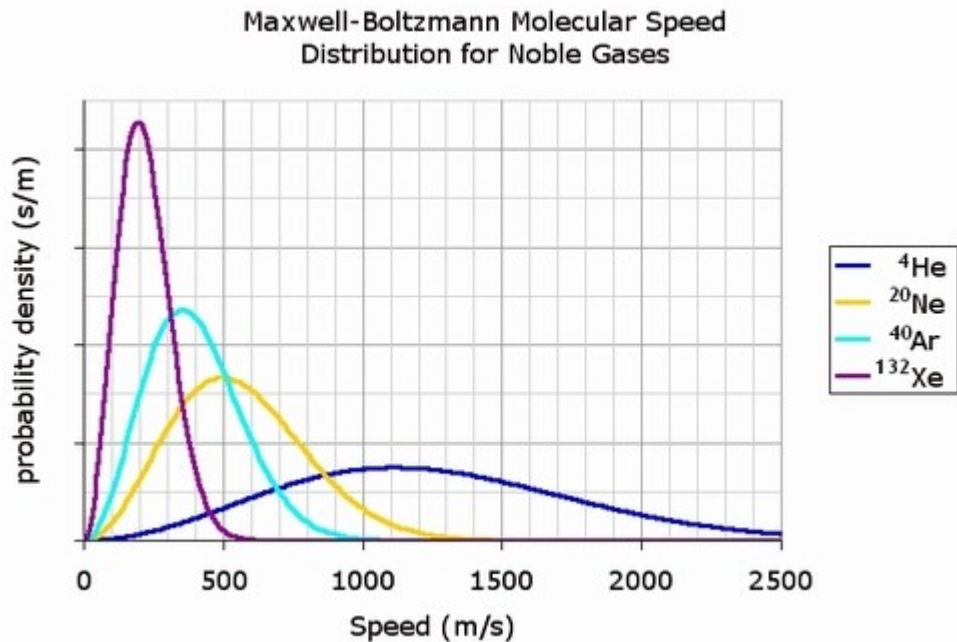
対流圏の大気組成の概略は、以下の通りです。

気体名	分子量	大気組成 %
ヘリウム	4.003	5.24×10^{-4}
水素	2.016	5×10^{-5}
窒素	28.013	78.09
酸素	31.999	20.95
二酸化炭素	44.010	0.04
水蒸気	18.015	~3.00
乾燥空気	28.966	100.00

この値は、対流圏の大気ではどこでもほぼ同じ値になります。しかし少し考えると不思議なことです。地球のような重力場であれば、重い気体ほど下に、軽い気体ほど上に重なる密度成層構造を持つことも考えられます。なぜ対流圏では大気組成が一様なのでしょう

か？

まず微視的な点から考えることにします。気体を構成する分子は、分子量と温度状態によって定まる速度分布を持っており、常に空間の中を移動しています。下図は、25°Cにおけるヘリウム、ネオン、アルゴン、キセノンの分子速度の分布を示したものです。

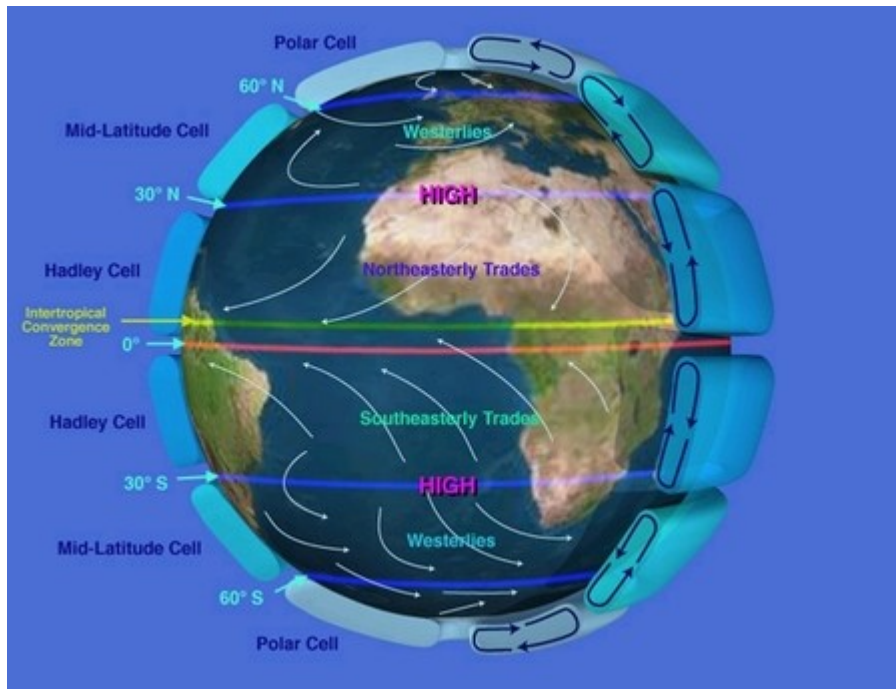


仕切りのある箱の中に一方には気体 A、もう一方には気体 B を入れておき、仕切りを取り外します。すると気体分子が運動する結果、次第に二つの気体は一様に混合することになります。

このように、微視的な分子運動によって二つの気体分子が一様に混合するような現象を分子拡散と言います。この時、気体 A は仕切りを取り外すことによって気体 B の存在する空間に一様に拡散します。逆に気体 B は気体 A の存在する空間に一様に拡散し、結果として A と B が一様に混合した気体になります。この様子は熱学的には拡散エントロピーの増加を示しています。一様に混合した気体は、この容器内における拡散エントロピーが最大の状態に対応します。重要なのは、閉鎖系（ここでは閉じられた箱）のエントロピーは常に増大し、減少することはありません。つまり、一旦一様に混合した気体が再び混合する以前の状態に戻ることは無いのです。

このエントロピー増大則は法則であって、これに反するような現象は自然界では観察されていないのです。これは、後述する人為的 CO₂ 蓄積説の検討において決定的に重要な意味を持ちます。

気体が混合する原因は分子拡散だけではありません。対流圏では、地表面で加熱された大気は膨張して密度が小さくなるために上昇傾向を持ちます。また、地表面環境から供給される水蒸気の分子密度 18 は大気密度 29 に比較して著しく軽いためにもこれも上昇傾向を持ちます。これに地球の自転による影響が加わって地球全面に亘る大気の循環構造が存在します。



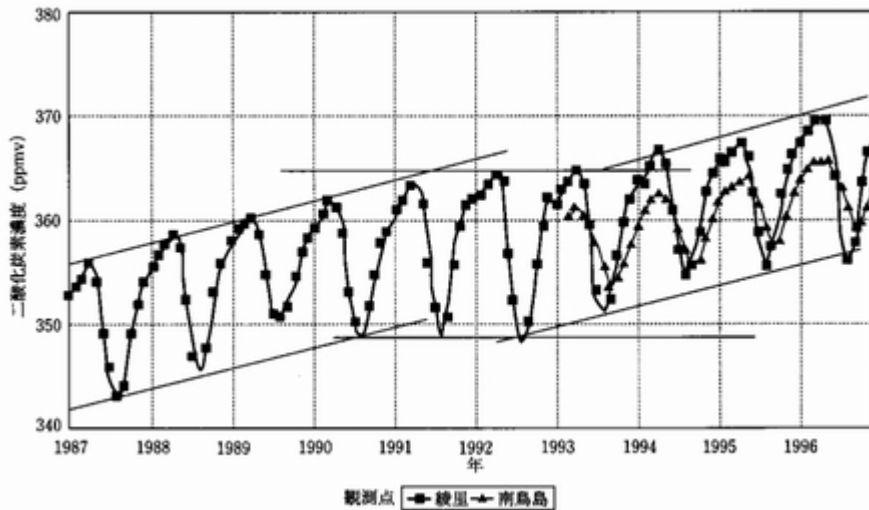
この様な巨視的な大気の流体運動による混合を乱流拡散と呼びます。

分子拡散と乱流拡散の相乗効果によって対流圏大気は、地域性あるいは高度による偏りの無い様な大気組成の状態になるのです。

さて、CO₂について考えてみることにします。CO₂は大気を構成する気体の中では、地表環境とのガス交換速度の速い気体です。大気に含まれるCO₂量は炭素重量で約750Gt、これに対して年間交換量は約200Gtにも達します。もしかすると地域によってCO₂濃度には大きなばらつきがあるかもしれません。

次に示す図は、Keelingによるハワイのマウナロア測候所による観測値と、気象庁による綾里と南鳥島における観測値です。





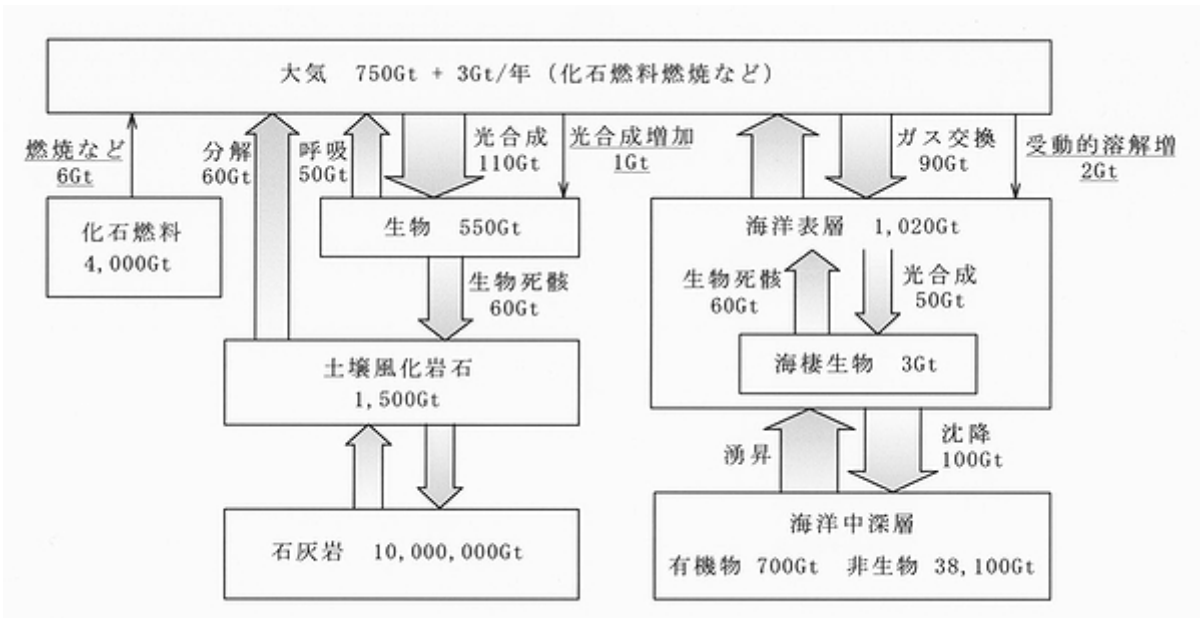
この観測値を見ると、CO₂濃度についても明瞭な地域性は認められず、よく対応しているようです。図に示した1990年にはフィリピンのピナツボ火山において大噴火があり、引き続き1993年までCO₂濃度の上昇傾向が鈍化した特殊な時期ですが、これについても良い対応を示しています。

この観測結果からも、対流圏における大気の混合速度は大変速く、速やかに一様に混合が進むと考えられます。

1-2 大気中のCO₂濃度の数学モデル

前節において、大気中に放出されたCO₂は排出源の如何、あるいは排出年次の如何に関わらず速やかに対流圏大気中に一様に拡散することが分かりました。ここでは、大気中に放出されたCO₂の経年変化を表す数学モデルを考えることにします。

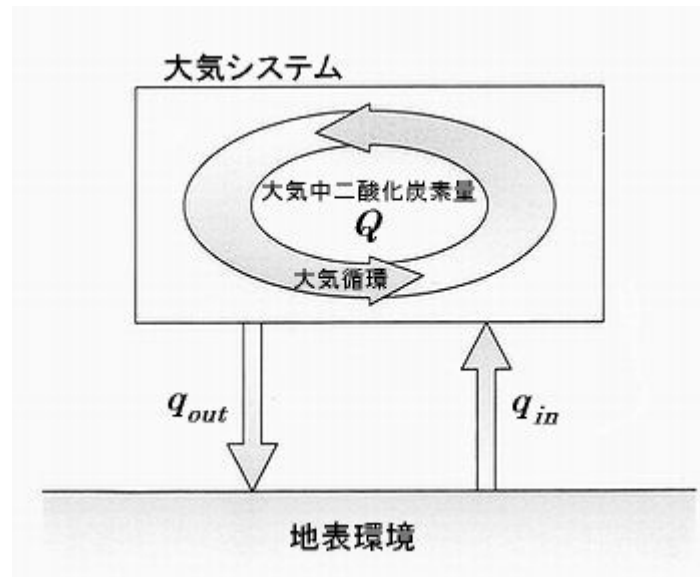
1-2-1 定常状態を表す等比級数モデル



大気中に含まれる CO₂ 量が増えない場合のモデルを考えることにします。まず、IPCC 第 2 次報告に基づいて作成した地球における炭素循環の概略を前頁の図に示します。矢印は 1 年間の炭素移動量を表しています。

この図から、大気中の CO₂ 量が増えない場合でも、大気は地表環境との間で常に CO₂ ガスの交換を行っていることがわかります。地表環境からは呼吸 (50Gt)、土壌風化 (60Gt)、海洋とのガス交換 (90Gt) を併せて年間約 200Gt (炭素重量) の CO₂ が大気中に放出されています。同時に、大気からは光合成 (110Gt)、海洋とのガス交換 (90Gt) の併せて約 200Gt の CO₂ が地表環境に吸収されています。

つまり、大気中に存在する CO₂ 量が増えないという状態は移動のない平衡状態ではなく、大気への CO₂ 流入量と大気からの CO₂ 流出量が等しい『定常状態』なのです。下図の記号を使えば、 $q_{in} = q_{out}$ と書き表すことができます。



IPCCによると、大気中に含まれる CO₂ の内、年間 30% 程度が交換されているそうです。大気中に含まれる CO₂ 量 Q の 30% が q_{in} 、あるいは q_{out} と等しくなるのです。つまり、

$$q_{in} = q_{out} = 0.3Q = rQ, \quad \text{ここに、} r = 0.3$$

r のことを (年間) 吸収率と呼ぶことにします。 r の物理的な意味は、大気中に一様に混合・拡散している全ての CO₂ に対する 1 年間の吸収確率ということになります。

ここで、定常状態にある大気について、大気中に含まれる CO₂ 量の経年変化を見ることにします。議論を簡単にするために、1 年毎の離散的な表現を用いることにします。初期状態において大気中に含まれている CO₂ 量を Q_0 (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_{in} (Gt/年) とします。

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

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

...

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

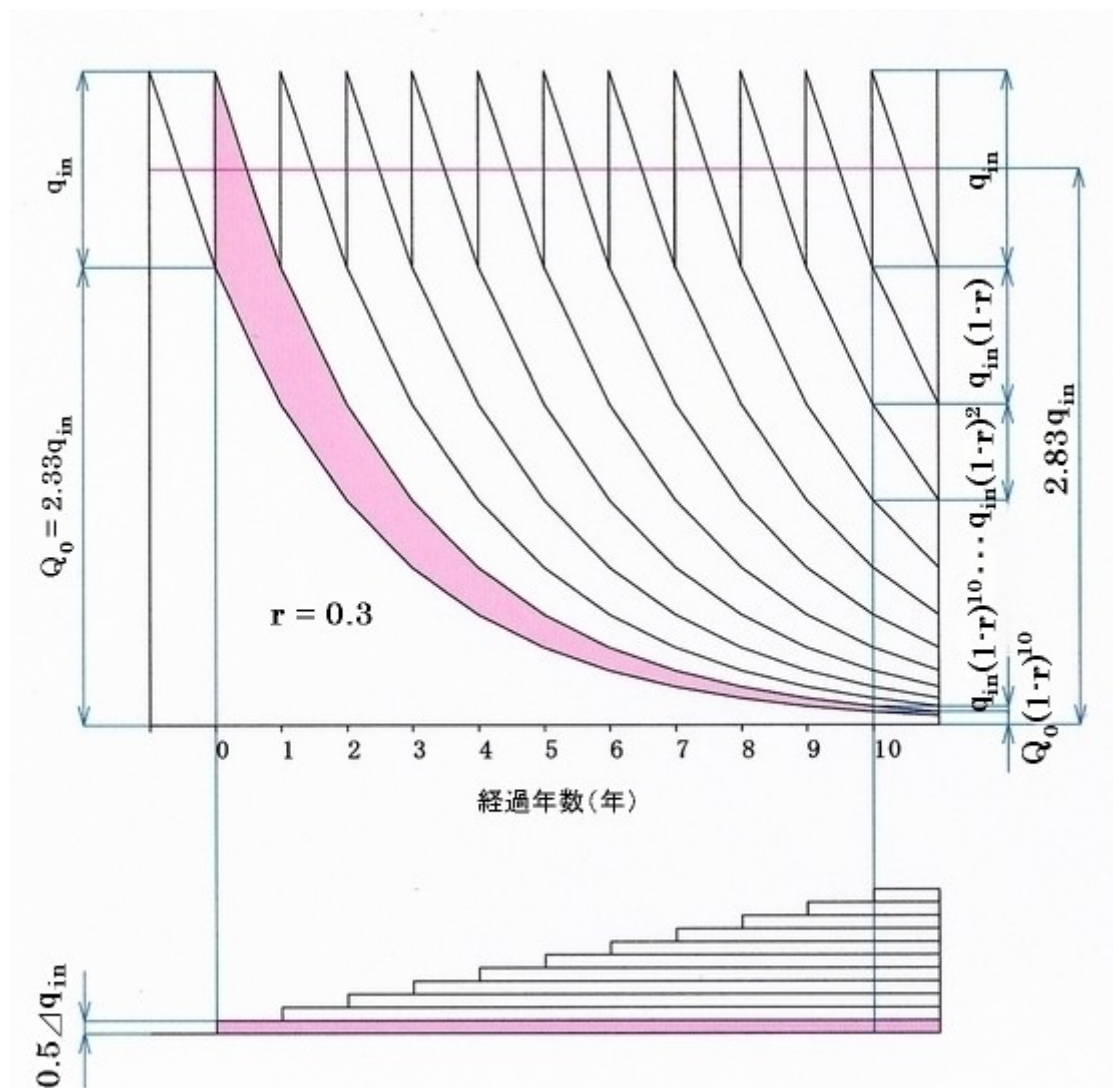
(n+1) 年目期首の大気中の二酸化炭素量は n 年目期末の式に q_{in} を加えることによって求められますので、等比数列の和の公式より次式で計算することができます。

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

大気中の CO_2 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できます。

$$Q = q_{in} / r \quad (= q_{out} / r)$$

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 CO_2 量 Q は、地表環境からの入力 q_{in} と地表環境の吸収率 r だけで決まるのです。この結果は冒頭に示した IPCC の主張と矛盾なく一致する数学モデルです。



以上に示した『等比級数モデル』について、 $r = 0.3$ とした場合の経年変化を $n = 10$ 年

目までグラフに表したものが前頁に示す上の図です。

1年間の離散的なモデルとしましたので、 Q の経年変化はノコギリ状になります。ノコギリの頂点は、期首における Q の値であり、上式から $Q = q_{in}/0.3 = 3.33q_{in}$ であり、ノコギリの谷は期末における Q 、あるいは Q_0 の値であり、 $2.33q_{in}$ になります。平均的に見れば、大気中には地表環境からの1年間の CO_2 排出量の2.83年分が存在すると考えることができます。

試算1. 産業革命以前の定常状態

産業革命以前では大気中 CO_2 濃度は280~285ppm程度で安定(=定常状態)していたと考えられています。地表環境からの年間 CO_2 排出量を $q_{in} = 200$ (Gt/年)、大気中の CO_2 の炭素重量2Gtが1ppmに相当するとします。地表環境の吸収率を $r = 0.3$ とすると、大気中に存在する平均的な CO_2 量は前頁の図から、 $2.83q_{in} = 566Gt = 283ppm$ となり、概ね妥当な値だと考えられます。

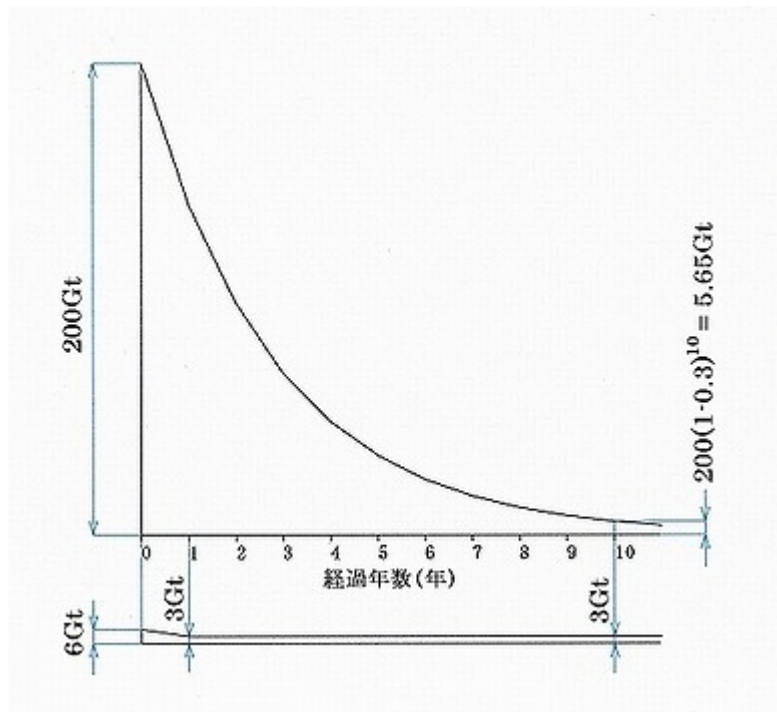
1-2-2 非定常状態を表す蓄積モデル

さて、Keelingは彼の行った南極とハワイにおける大気中 CO_2 濃度の連続精密観測のデータから、近年の大気中 CO_2 濃度の上昇量は、人為的な石炭や石油をはじめとする炭化水素燃料の燃焼によって排出されている CO_2 = 「人為的 CO_2 排出量」の半量程度に相当すると発表しました。これについては原著を読んでいないので、彼の主張の主旨が単に量的に見て人為的 CO_2 排出の半量程度に相当すると言っただけなのか、あるいは人為的 CO_2 排出量の半量が蓄積することによって大気中 CO_2 濃度が上昇するという現象が起こるのだと主張したのかは定かではありません。

しかし、その後の標準的な人為的 CO_2 地球温暖化仮説においては、明らかに人為的 CO_2 排出量の半量程度が大気中に蓄積することによって近年の大気中 CO_2 濃度が上昇していると主張するようになりました。このことが現在の温暖化対策として CO_2 排出量削減が叫ばれている「理論的」背景となっています。しかし、この人為的 CO_2 蓄積仮説は、冷静に考えると子供の思いつき程度の考えに過ぎず、とても科学的な評価に値するものではありません。

大気中 CO_2 濃度が定常状態にあった状態から、何らかの理由、ここでは人為的な CO_2 排出量の増加によって、地表環境から大気への CO_2 排出量が q_{in} から $(q_{in} + \Delta q_{in})$ に増加した場合を考えます。蓄積仮説ではこの内 q_{in} については以前の定常状態のままであり、増加した Δq_{in} の半量程度が永久に(!)大気中に留まり続けると考えます(前頁の下の図)。

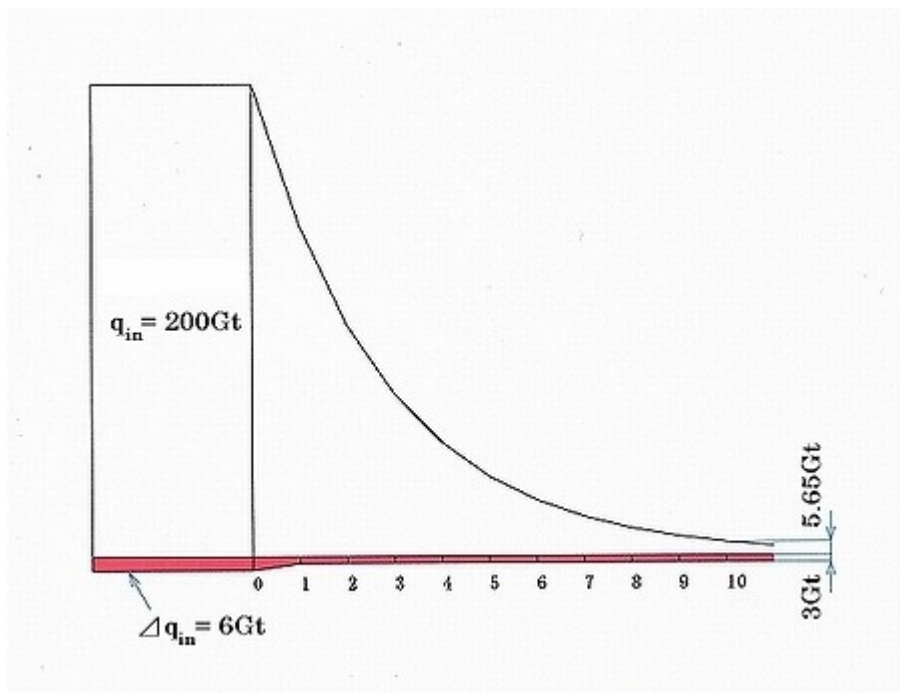
定常部分と蓄積部分について単年度分(前頁の図で桃色に着色した部分)についてだけ取り出してその経年変化を考えてみます。具体的な数値として前掲のIPCC第2次報告を元にした炭素循環図の値を使用します。つまり、 $q_{in} = 200Gt$ 、 $\Delta q_{in} = 6Gt$ とします。



定常部分に含まれる 200Gt の CO₂ は、年率 30% の割合で減少してゆきます。10 年後には 5.65Gt、当初の 3% 以下にまで減少します。これに対して蓄積部分は、初年度期末までに 6Gt から 3Gt に減少した後は、永久に 3Gt のまま大気中に蓄積し続けることとなります。

ここで大きな疑問が生じます。初年度で減少した 3Gt の CO₂ は一体どこに消えたのでしょうか？これがいわゆる「ミッシング・シンク」と呼ばれる問題です。この問題については後で検討することになります。

A. 人為的 CO₂ 蓄積モデル



さて、はじめに標準的な人為的 CO₂ 地球温暖化仮説の元になる人為的 CO₂ 蓄積モデルに

ついて考えることにします。

人為的 CO₂ 蓄積モデルでは、自然起源の CO₂ である 200Gt は等比級数モデルに従って年とともに減少しますが、人為起源の CO₂ (赤で着色) である 6Gt は初年度に半減した後は変化せずに大気中に蓄積されると主張しています。

しかし、このモデルは実際には物理学の法則を無視したあり得ないモデルです。すでに「1-1 対流圏大気の性状」で示したとおり、大気中に放出された CO₂ は大気中で急速に攪拌されて発生源の如何、発成年次の如何を問わず一様に混合・拡散しています。一様に混合した大気中の CO₂ の中から、自然起源の CO₂ と人為起源の CO₂ が再び「分離」して、自然起源の CO₂ は等比級数モデルで表現される循環過程に従って振舞い、人為起源の CO₂ は蓄積過程に従って振舞うということは、拡散・混合エントロピーが減少しない限り起こり得ません。自然界ではエントロピーが減少するような現象は起こらないというエントロピー増大の法則に照らして、人為的 CO₂ 蓄積モデルは不合理なのです。

試算2. 人為的 CO₂ 蓄積モデルによる現在の大気

このモデルを使って、産業革命から今日に至る大気中 CO₂ 濃度について試算してみます。

試算1. から、産業革命以前の定常状態では、大気中に含まれる CO₂ 量は炭素重量で 566Gt (283ppm) でした。これに対して、IPCC 第2次報告では大気中に含まれる CO₂ 量は 750Gt (375ppm) です。つまり、大気中には $(750 - 566) = 184\text{Gt}$ (92ppm) の人為的 CO₂ が蓄積されていることとなります。産業革命からの経過年数を 200年とすると、平均的には年率 0.92Gt の人為的 CO₂ が蓄積されたこととなります。IPCC 第2次報告 (1995年) 当時は、年率 6Gt 程度の排出がありますので、蓄積量は 3Gt です。

B. CO₂ 蓄積モデル

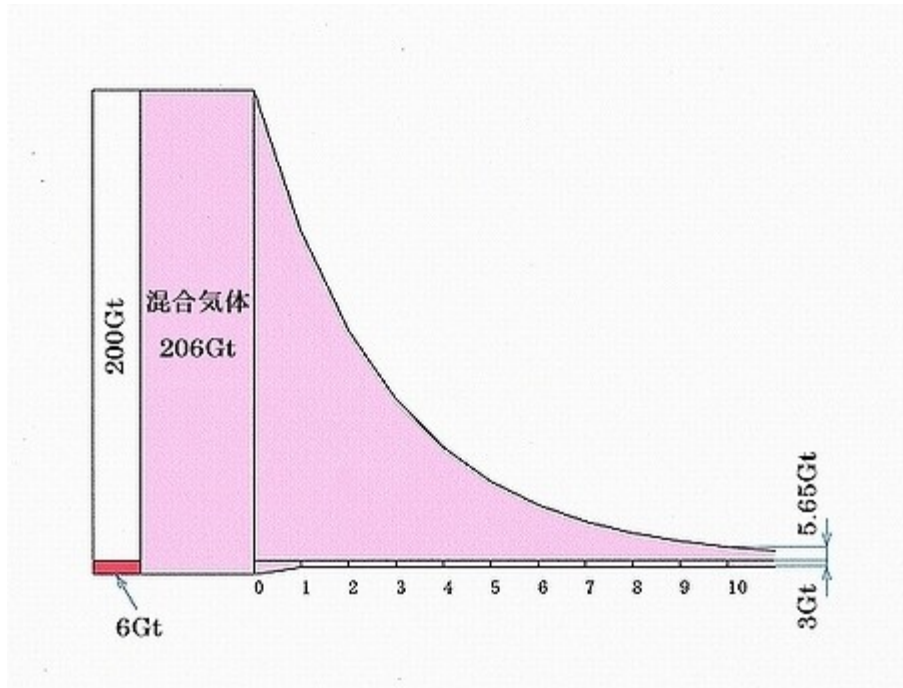
人為的 CO₂ 蓄積モデルは物理法則を無視した子供の発想でした。そこで少しこれを修正してみます。これは消極的な表現ですが、物理学会誌に掲載された阿部氏の発言『人為的に排出された CO₂ の一部は吸収の増加で補償されるが、残りは大気中の純増 (蓄積) になっているというのは、十分にありうることだと思う。』(日本物理学会誌 Vol.62.No.7,2007 『会員の声』 CO₂ 増加は自然現象だろうか/阿部修治, <産総研>) に現われています。

つまり、阿部氏の主張は蓄積モデルを否定していませんが、人為起源の CO₂ についても一部は循環過程に入ることを容認しているのです。これをエントロピー増大の法則に抵触しないモデルにしようと思います。

まずその (暗黙の) 前提ですが、地球大気中では循環過程 (級数モデル) で処理される CO₂ 量には閾値が存在し、これを越える CO₂ は蓄積過程で処理されるという仮定です。しかも、たまたまその閾値は産業革命以前の定常状態である年間排出量 200Gt であるという、実にご都合主義の仮定ですが……。議論が先に進まないで、ひとまずこの仮定を承認して

おきましょう。

人為的 CO₂ 蓄積モデルと異なるのは、自然起源の CO₂ と人為起源の CO₂ は一様に混合しており、その混合気体の内の 200Gt は循環過程に、6Gt は蓄積過程に従って振舞うのです。下図において桃色で示した部分が一様に混合した気体（自然起源 CO₂: 人為起源 CO₂ = 200 : 6）を表しています。



上図において、10年後に大気中に残存する人為起源の CO₂ の量を計算すると、 $(3+5.65) \times (6/206) = 0.25\text{Gt}$ になります。人為的 CO₂ 蓄積モデルの 10 分の 1 以下になるのです。

試算3. CO₂ 蓄積モデルによる現在の大気

現在の大気に含まれる CO₂ 量は 750Gt、そのうち循環過程に含まれる CO₂ 量は 566Gt、蓄積過程に含まれる CO₂ 量は 184Gt です。

循環過程に含まれる CO₂ の内、人為起源の CO₂ 量は等比級数モデルですから $6/206 \div 2.9\%$ です。蓄積過程に含まれる CO₂ 量に関しましては、人為的な CO₂ 排出量は過去に遡るほど 6Gt よりも小さくなりますから、平均的には多めに見積もって 3Gt と仮定して $3/203 \div 1.5\%$ とします。

以上から、現在の大気に含まれる人為起源の CO₂ 量は、 $566 \times 0.029 + 184 \times 0.015 = 19.2\text{Gt} = 9.6\text{ppm}$ ということになります。

つまり、CO₂ 蓄積モデルを仮定した場合でも、現在の地球大気に含まれる CO₂、この試算では 375ppm の大部分は自然起源の CO₂ であって、人為的な CO₂ 排出量を削減してもその効果は微々たるものに過ぎないのです。

1-2-3 非定常状態を表す循環モデル

人為的 CO₂ 蓄積モデルは明らかにエントロピー増大則に反するモデルであり、現実の自

自然界では起こり得ないので、これ以上の検討の必要はありません。以降は一様混合大気に対する CO₂ 蓄積モデルについてだけ検討することにします。

CO₂ 蓄積モデルでは、閾値＝地表環境からの年間 CO₂ 排出量 200Gt を境にして、200Gt までは循環過程の定常状態を維持し、これを越えた部分は蓄積モデルに従うという仮定の下に成り立っています。しかし、常に乱流拡散・分子拡散によってかき混ぜられている現実の大気を考えれば、大気の特定期間だけが他と違う振る舞いをし続けるというのは、やはりあり得ないことです。

さて、循環モデルでは地表環境と大気との間で CO₂ が交換されていることに基づいて、定常状態に対して次のように表しました。

$$q_{\text{out}} = rQ = q_{\text{in}}, \quad \text{ここに、} r : \text{年間吸収率}$$

つまり、大気中に存在する一様に混合している全ての CO₂ が全く同じ年確率 r で地表環境に吸収されることを主張しているのです。そして、大気中から失われた CO₂ 量 q_{out} と同じだけの地表環境からの CO₂ 排出量 q_{in} の供給が失われた CO₂ 量を補うのです。定常状態にある大気中の CO₂ 量は、地表環境からの年間 CO₂ 排出量 q_{in} と地表環境の年間吸収率 r を定数とすることによって、等比級数モデルとして表せたのです。

では非定常な場合の循環モデルはどのように表されるのでしょうか？大気中に存在する一様に混合している全ての CO₂ が全く同じ年確率 r で地表環境に吸収されるという循環モデルの基本的な関係は変更する必要はありません。ただ、大気中の CO₂ 濃度が非定常に変化する原因＝地表環境の変化をモデルに取り入れる必要があります。具体的には、モデルに現われる量を時間 t の関数として取り扱うことが必要になります。つまり、

$$q_{\text{out}}(t) = r(t)Q(t) \neq q_{\text{in}}(t), \quad \text{ここに、} r(t) : \text{年間吸収率}$$

もし、 $q_{\text{out}}(t) < q_{\text{in}}(t)$ の関係にあれば大気中 CO₂ 量 $Q(t)$ は増加し、逆に $q_{\text{out}}(t) > q_{\text{in}}(t)$ であれば減少することになります。

$r(t)$ の具体的な意味を考えてみましょう。炭素循環図を見ると、大気から CO₂ を吸収する主要な現象は植物の光合成と海洋の吸収です。この二つの条件は産業革命当時と現在ではかなり違ってきている可能性が高いと考えられます。

例えば、陸上では都市化が進むと同時に森林伐採が進み、農地の砂漠化も進んでいます。これは陸上植物の光合成活性度＝大気中 CO₂ 吸収量の低下になる可能性を示唆しています。

またこの間、地球の平均気温は小氷期後期から引き続く上昇傾向を示しています。海洋表層の水温も同じ傾向を示します。海洋表面におけるガス交換はヘンリーの法則から、気温が高くなれば海洋表層水の CO₂ 溶解度は小さくなりますから、これも大気中 CO₂ 吸収量の低下として現われる可能性が高いと考えられます。

年間吸収率 $r(t)$ は産業革命当時から次第に小さくなっていることが推測されますが、その詳細についてはここでの議論の範囲を超えますのでこれ以上触れませんが、一般的に言えることは年間吸収率 $r(t)$ や地表環境からの CO₂ 排出量 $q_{\text{in}}(t)$ は非定常に変化するという

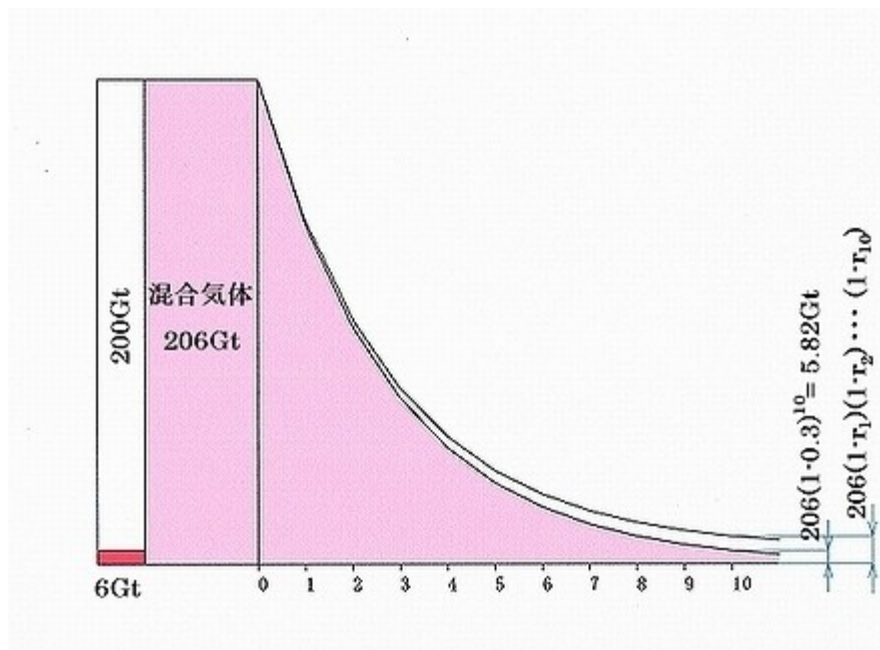
ことです。

さて、CO₂蓄積モデルについてもう一度考えることにします。CO₂蓄積モデルでは、蓄積過程によって処理されるCO₂に対して、初年度には排出された量の半分が減少します。この減少したCO₂はどこに行くのでしょうか？消滅するか宇宙空間に放出されるのであれば、やはり地表環境に吸収されるしかないのではないのでしょうか？つまり蓄積過程とは、初年度の年間吸収率 $r_1 = 0.5$ 、2年目以降の年間吸収率 $r_n (n=2,3,4,5\cdots) = 0$ とした場合の非定常循環モデルの特殊な場合と考えることが出来ます。

しかし現象的に考えると、一様に混合した大気中のCO₂の中で、一部分のしかも初年度の年間吸収率だけが特別な値になるということは、エントロピー増大則に反する不合理なモデルだと考えます。私たちは大気中で一様に混合したCO₂は全て同じ循環過程に従うことが最も合理的だと考えます。

非定常循環モデルの大気中CO₂濃度の経年変化を考えることにします。定常状態における循環モデルの場合と同様に、(n+1)年目期首における大気中のCO₂量 $Q(t)$ は次のように表すことが出来ます（ただし初期値 Q_0 の影響は省略しています）。

$$\begin{aligned} Q(t) &= q_{in1} \times (1 - r_1)(1 - r_2)(1 - r_3) \cdots (1 - r_n) \\ &+ \cdots \\ &+ q_{in(n-1)} \times (1 - r_{(n-1)})(1 - r_n) \\ &+ q_{in(n)} \times (1 - r_n) \\ &+ q_{in(n+1)} \end{aligned}$$



この場合について、自然起源のCO₂排出量を炭素重量で200Gt、人為起源のCO₂排出量を6Gtとした場合の単年度分のCO₂排出量の10年目までの経年変化を図に示します。

図は、 $r_n < r_{(n-1)}$ つまり、年間吸収率が減少傾向を示す場合について示しています。重要なことは、定常状態の循環モデルであろうと非定常循環モデルであろうと、残存する CO₂ 量に含まれる人為起源の CO₂ 量の割合は常に 6/206 で一定なのです。

実際には地表環境からの CO₂ 排出量は、人為起源の CO₂ 排出量に着目すれば産業革命前の 0Gt から現在の 6Gt 程度にまで増加しています。つまり、過去に遡るほど人為起源の CO₂ 量の混合比率は小さいのです。大気中ではこれが一様に混合していますから、現在の大気に含まれる人為起源の CO₂ の割合は 6/206 よりも小さいのです。

一般的には、人為的 CO₂ 排出量が単調に増加していると仮定すれば、現在の大気に含まれる CO₂ 量に、現在の地表環境からの総 CO₂ 排出量に対する人為起源の CO₂ 排出量の割合をかけてやれば、多少多めに見積もった大気中に残存する人為起源の CO₂ 量を推定できるのです。

試算4. 循環モデルによる現在の大気

人為的 CO₂ 蓄積モデルの条件は、人為的な CO₂ 排出以前の定常状態はそのまま継続するとして、これに加えて人為的な CO₂ 排出量の半量程度が大気中に蓄積するというものです。この場合、循環部分についての条件は変化しないのですから、試算1. で示した $r = 0.3$ はそのまま変化しないこととなります。

この条件に従えば、循環モデルは $r = 0.3$ の等比級数モデルとなります。実際には人為的な排出量は 0Gt から 6Gt に増加することになりますが、ここでは人為的な影響を大きめに見積もって 6Gt に固定しておきます。等比級数モデルでは地表環境からの CO₂ 排出量の変化の影響は急速に一定値に収束し、 $r = 0.3$ の場合、定常状態 (= 最大値) では大気中 CO₂ 量は総 CO₂ 排出量の 2.83 年分になります (試算1. 参照)。つまり、自然起源の排出量 200Gt に人為起源の排出量 6Gt が加わった場合の大気中に存在する平均的な CO₂ 量は、 $Q = 2.83 \times (200 + 6) = 583\text{Gt}$ になります。

人為的な CO₂ 排出量増加の影響はわずかに $583 - 566 = 17\text{Gt}$ 、CO₂ 濃度に換算して 8.5ppm の上昇にしかならないのです。この点について植田氏は過去 45 年間の実際の観測値を元に物理学会誌 (日本物理学会誌 Vol.62, No.2, 2007 「CO₂ を削減すれば温暖化は防げるのか」) において次のように報告しました。

人間が毎年排出する CO₂ についても、その 30% は陸と海に吸収され、70% が大気中に残る。この量は CO₂ 温暖化説で大気中に溜まるという 55.9% よりも多い。

しかし、今年溜まった 70% の人為的 CO₂ がいつまでも大気中に残ることはない。去年の分は 70% の 70%、つまり 49% しか残っていない。一昨年の方は 70% の 70% の 70%、つまり 34.3% しか残っていない。

この人為的 CO₂ の大気中に溜まる量の最大値は、 $0.7 + (0.7)^2 + (0.7)^3 + \dots = 0.7 / (1 - 0.7) = 2.33$

と簡単に計算できて、人為的排出で溜まる CO₂ の量は最大でも 2.33 年分でしかない。これは一定割合で目減りする (負の利息の) 定額貯金のようなものだ。

大気中の CO₂ で過去 45 年間に増加した 64ppm は人為的排出量の 25.2 年分に相当するから、

2.33 年分はその9%である。したがって、全体の増加量64ppmのうち、人為増加量は9%の6ppmで、残りの58ppmは気温などにより陸海から放出された自然増加量だったのである。

(近藤註：この2.33年分は期末の残存量です。)

この榎田氏の主張に対する阿部氏の反論は的外れなものです。前掲の物理学会誌における阿部氏のレポートで次のように述べています。

…最初の計算における、大気中のCO₂総量が増えても常に30%交換されるという仮定は、海と陸のCO₂吸収能力がCO₂濃度変化にすぐに追従することを前提としている。しかし、実際にはCO₂吸収能力の応答時間にはさまざまなものがあり、遅いものでは海の表層と真相の交換に関わる数百～数千年の時間スケールもある。2)人為的に排出されたCO₂の一部は吸収の増加で補償されるが、残りは大気中の純増(蓄積)になっているというのは、十分にありうることだと思う。

阿部氏の主張は、地表環境のCO₂吸収率を $r=0.3$ に固定したことを不合理と述べているわけですが、これは私もその通りだと思います。しかし、これは冒頭で述べたように、人為的CO₂蓄積モデルが成立するための条件なのです。

もし吸収率が変化すると、大気中に含まれる自然起源のCO₂量が増えたり減ったりするので、人為的CO₂蓄積モデルの前提が崩れてしまうことになるのです。榎田氏はあくまでも人為的CO₂蓄積モデルの条件を用いた試算を行ったに過ぎないのです。その結果、循環モデルに従えば人為的CO₂排出量の増加では現実を説明できないことを主張したのです。

また、次に示すように現実の大気中CO₂濃度を表すように吸収率 r を調整しても(=非定常循環モデル)榎田氏の主張の本質は変わらないのです。阿部氏は揚げ足を取っただけで具体的な検討を怠ったようです。

さて、前述の通り『一般的には、人為的CO₂排出量が単調に増加していると仮定すれば、現在の大気に含まれるCO₂量に、現在の地表環境からの総CO₂排出量に対する人為起源のCO₂排出量の割合をかけてやれば、多少多めに見積もった大気中に残存する人為起源のCO₂量を推定できる』ので、これに従って現在の大気中に含まれる人為起源のCO₂量を推定してみます。現在の大気中CO₂量を750Gt、自然起源の年間CO₂排出量を200Gt、人為起源の年間CO₂排出量を6Gtとします。

大気中には平均的に見て地表環境からの年間CO₂排出量の $750/(200+6) = 3.64$ 年分のCO₂が存在します。期首におけるCO₂量は平均的な値+0.5年分なので4.14年分になります。つまり、地表環境の年間CO₂吸収率は、 $r = 1/4.14 = 0.24$ になります。自然起源のCO₂排出量200Gtが変化しなかったとすると、産業革命以前の値 $r = 0.3$ に比較して、現在の地表環境はかなりCO₂吸収率が下がっているようです。

大気中CO₂量750Gtに占める人為起源のCO₂量は、 $6/(200+6) = 0.029$ なので最大でも $750 \times 0.029 = 21.8\text{Gt} = 10.9\text{ppm}$ を越えることは無いのです。

循環モデルによる推定値は、試算3.のCO₂蓄積モデルによる推定値 $19.2\text{Gt} = 9.6\text{ppm}$

とほとんど変わらないのです。実は、どのようなモデルを使っても、

①地球環境から排出される CO₂は一様に混合しており、

②大気中 CO₂量を適切に表現している

限り、大気中に含まれる人為起源の CO₂量の推定値には大きな差は生じないのです。

二つのモデルの特性の違は、循環モデルは近い過去の影響ほど強く、過去に遡るほど影響が小さくなるのに対して、蓄積モデルでは時間経過による影響の違いが生じないのです。だから、人為的 CO₂排出量が単調に上昇しているという条件の下では、最近の影響をより強く受ける循環モデルの方が多少大きめの値を示すのです。

1-3 結論 CO₂濃度上昇の主因は自然変動

以上の検討から、産業革命以降に観測されている大気中 CO₂濃度の 90ppm 程度の上昇分の内、人為的な CO₂排出の増加による影響はどのように見積もっても高々 11ppm にも満たないのであり、大気中 CO₂濃度上昇の主因は人為的な CO₂排出ではあり得ないことが明らかになりました。

また、急速に混合の進む対流圏大気の特徴から考えて、近年の CO₂濃度の変動を最も適切に表現できるのは循環モデルであり、CO₂蓄積モデルはエントロピー増大則に反する不合理なモデルなのです。

仮に CO₂地球温暖化仮説が正しかった場合でも、人為的な CO₂排出量の削減努力によって大気中 CO₂濃度を劇的に減らすことは出来ないものであり、温暖化対策としての人為的 CO₂排出量削減は無意味なのです。

2. Keeling 曲線の示唆するもの

2-1 大気中の CO₂濃度の構成

これまでの検討から、大気中に存在する CO₂の総量と地表環境からの発生源毎の年間 CO₂排出量が把握できれば、大気中 CO₂の排出源別の構成の概略を推定することが出来ることがわかりました。

ここで、IPCC 第二次報告の炭素移動量を現在値として、過去 40 年間の大気中 CO₂濃度の変化と、その構成を推定してみることになります。

炭素循環図の値から試算した大気中 CO₂濃度の構成を表に示します。ただし、

①過去 40 年間に於いて、大気中 CO₂濃度は年率 1.5ppm の割合で増加し、

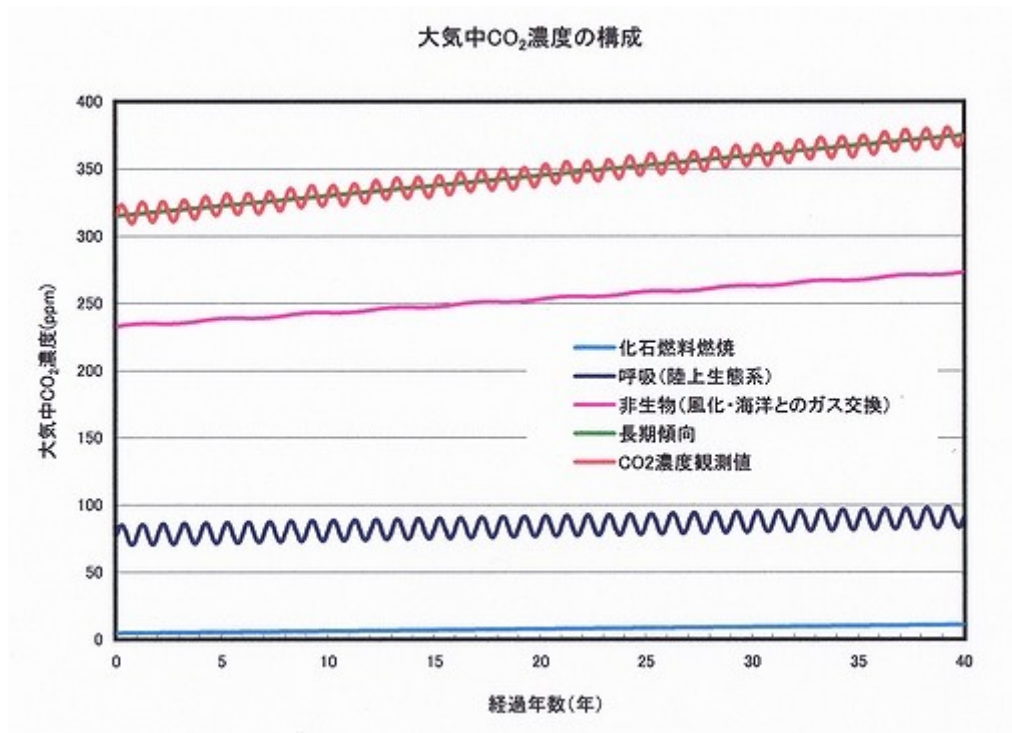
②40 年前の化石燃料燃焼による年間 CO₂放出量は現在の半分の 3Gt/年、

③その他の排出源については変化しない

という仮定の下での試算です。

	現在値		40年前	
	年間排出量	大気中濃度	年間排出量	大気中濃度
化石燃料燃焼	6Gt/年	10.9ppm	3Gt/年	4.7ppm
呼吸（陸上生態系）	50Gt/年	91.0ppm	50Gt/年	77.6ppm
非生物（風化・海洋とのガス交換）	150Gt/年	273.1ppm	150Gt/年	232.8ppm
合計	206Gt/年	375ppm	203Gt/年	315ppm
年間吸収率	0.242		0.278	

この試算の結果をグラフ化したものを下図に示します。



この模式図では、呼吸については季節変動＝1年周期、非生物についてはエルニーニョ・スケールの変動を模して4年周期のサイン曲線で表される変動成分を加えて表しています。具体的には、

$$[\text{呼吸による CO}_2 \text{濃度}] = 77.6 + 0.335t + 7.5\sin[1]$$

$$[\text{非生物による CO}_2 \text{濃度}] = 232.8 + 1.01t + 0.8\sin[4]$$

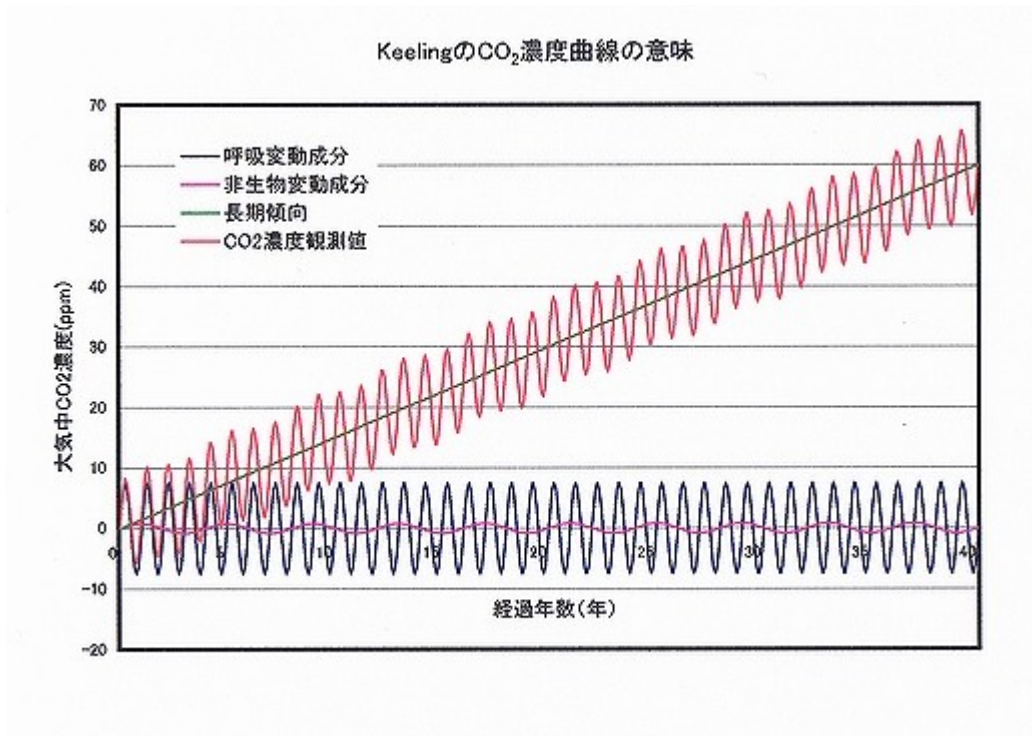
$$[\text{化石燃料燃焼による CO}_2 \text{濃度}] = 4.7 + 0.155t$$

$$[\text{大気中 CO}_2 \text{濃度}] = 315 + 1.5t + 7.5\sin[1] + 0.8\sin[4]$$

ただし、 t は経過年数、 $\sin[1]$ は1年周期のサイン曲線、 $\sin[4]$ は4年周期のサイン曲線を表しています。

2-2 Keeling 曲線の意味

前の模式図を元に、40年前の大気中 CO₂ 濃度を原点とした増加量を次図に示します。併せて、呼吸の季節変動成分と非生物のエルニーニョ・スケールの変動成分を示しておきます。



上図における『CO₂ 濃度観測値』とは、40年前の大気中 CO₂ 濃度を原点として、長期の変動傾向と、呼吸と非生物の変動成分を加えたものです。具体的には、

$$[\text{CO}_2 \text{ 濃度観測値}] = 1.5t + 7.5\sin[1] + 0.8\sin[4]$$

いわゆる Keeling 曲線に示している CO₂ 濃度の変動とは、この CO₂ 濃度の観測値から長期的な上昇傾向と呼吸の季節変動成分を差し引いたものです。つまり、

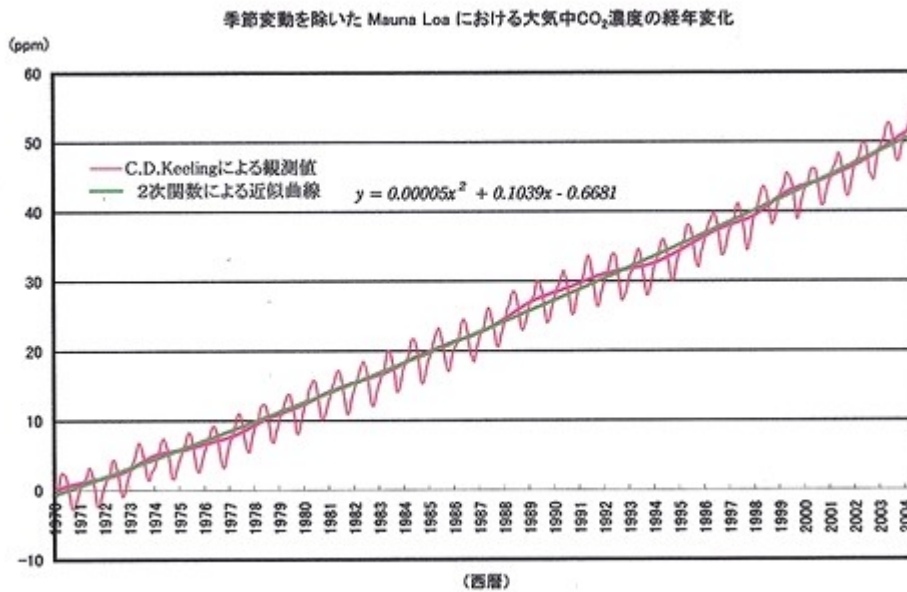
$$[\text{Keeling 曲線の CO}_2 \text{ 濃度}] = 0.8\sin[4]$$

です。これは、上図において 0 点を振幅の中心とする桃色のサイン曲線に対応する非生物変動成分です。

ここに示した模式図は、あくまでも議論を単純化するために簡略化した試算によるモデルであることに注意してください。実際には、おそらく呼吸による CO₂ 排出についてもエルニーニョ・スケールの変動の影響があるはずですが、季節変動の振幅に比べて小さいであろうという推定から、ここでは無視しています。その他についても同様ですが、これに関しましては今後の観測によって明らかにするしかありません。

さて、ではここで実際の観測値を示しておくことにします。次図は Keeling によるハワ

イにおける観測データを示したものです。

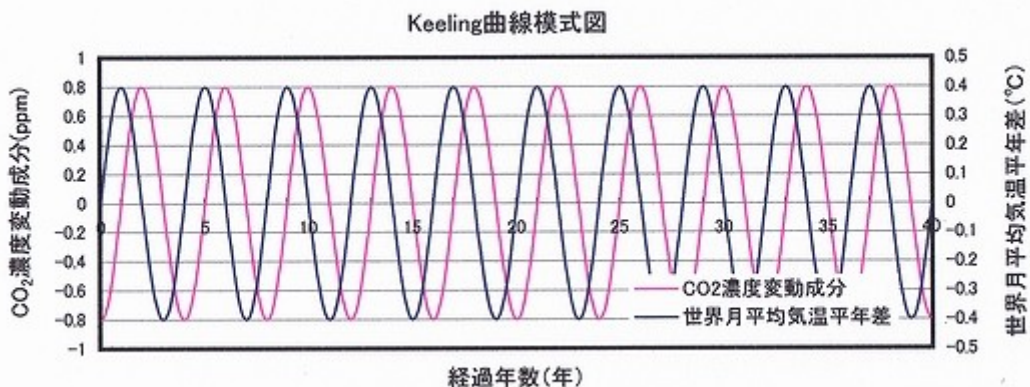


赤色で示した観測データから季節変動成分を取り除く（例えば1年の移動平均を取る）ことで桃色で示した数年周期の不規則変動を求めます。更に長期傾向、例えば上図の緑色で示した回帰曲線からの偏差を求めることによって、いわゆる Keeling 曲線に示された CO₂ 濃度変動に類似の曲線を得ることが出来ます。

実際の Keeling 曲線について、気象学会誌『天気』（気象学会誌「天気」2005年6月号 pp.71-72/河宮未知生）によると次のようにして求めている様です。

ここで、第1図の気温の変化は、Hansen and Lebedeff (1988) のデータを一部変更したもので、全球平均の月平均気温をスプラインでつないだものを1951-1970年の平均値からのずれとして示したもの。CO₂はマウナロアと南極観測点での平均値で、長期的な上昇曲線と季節変化は抜いてあり、年々変動のみを見ているものです。

ただし、この説明だけでは具体的に長期傾向としてどのような値を用いたのかは不明なので、残念ながら Keeling 曲線を完全に復元することは断念しました。

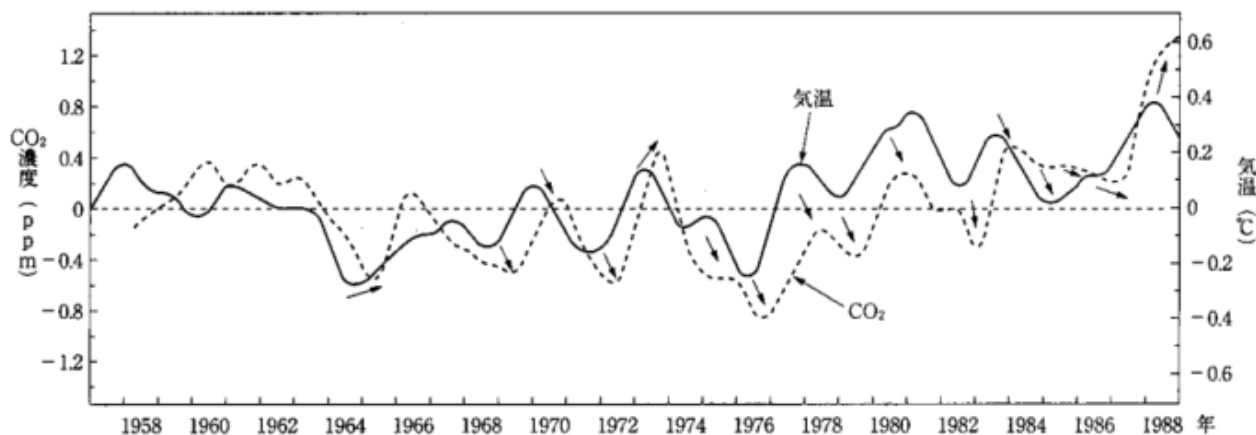


さて、Keeling 曲線のもう一つの要素は全球の月平均気温の期間の平均値からの偏差で

す。注意すべき点は、気温については平均値からの偏差であって、CO₂ 濃度の場合のように長期的な変動傾向は取り除かれていないということです。CO₂ 濃度の変動部分と気温偏差の変動の模式図を前頁に示しておきます。

CO₂ 濃度の変動成分と全球月平均気温偏差の変動を表す曲線は、模式図のように相似の波形ですが、少し位相にずれが生じます。模式図ではいずれの曲線もサイン曲線であるため、CO₂ 濃度の変動が気温変動の先に起こるのか後に起こるのかを判断できません。

次に実際の Keeling 曲線を示すことにします。



実際の Keeling 曲線では、変動は不規則なため、前後関係を特定することが出来ます。気温の変動が先で、1年程度の遅れで CO₂ 濃度が増加するのです。

つまり Keeling 曲線は、気温と CO₂ 濃度の中に現象的にどのような関係が有るのかまでは特定できませんが、少なくとも気温変動が原因となって、その結果として CO₂ 濃度が増加することを示したのです。

この Keeling 曲線に対して、河宮氏は前掲書の中で『二酸化炭素の経年変化を示した第1図 (Keeling et al., 1989 の p.210 の Fig.63 : 根本, 1994 の p.151 の図 7-4) に因れば、気温の変化が二酸化炭素の変化に 1~1.5 年先行しているように見えます。これはどのように考えたらよいのでしょうか?』という問いに対して次のように述べています。

回答：問題とされている図に関してまず注意しなければならないのは、質問中でも指摘されている通り、二酸化炭素の長期的な上昇傾向が除いてあるという点です。地球温暖化の原因となるのは正にこの長期的な上昇傾向です。それが取り除かれたこの図で表されているのは自然起源の変動であり、人間活動に端を発する地球温暖化とは比較的関連の少ないものと言えます。(後略)

河宮氏の『回答』は、これまでの検討から分かるように全く現実を無視したものです。彼は、大気中 CO₂ 濃度の長期変動の主因が人為的な CO₂ 排出であるとしています。つまり、人為的 CO₂ 蓄積モデルが正しいと信じて理論を組み立てているのです。

しかし現実には循環モデル以外に合理的な解釈は無く、循環モデルによれば『大気中 CO₂

濃度の構成』で示したとおり、長期的な傾向に対する人為的な影響＝化石燃料の燃焼の影響はわずかであり、大部分は自然変動なのです。

また、問の趣旨は、気温変動が CO₂ 濃度変動に先行する理由を求めているわけですが、なぜか河宮氏はこの点には明確に答えていません。無理やりに解釈すれば『この図で表されているのは自然起源の変動であり、』、自然変動については気温変動が先に起こり、CO₂ 濃度変動はその結果として起きると言うのかもしれませんが。いずれにせよ、この Keeling の図からは、CO₂ 地球温暖化仮説を支持するような現象を読取ることは出来ません。回答は完全に破綻しています。

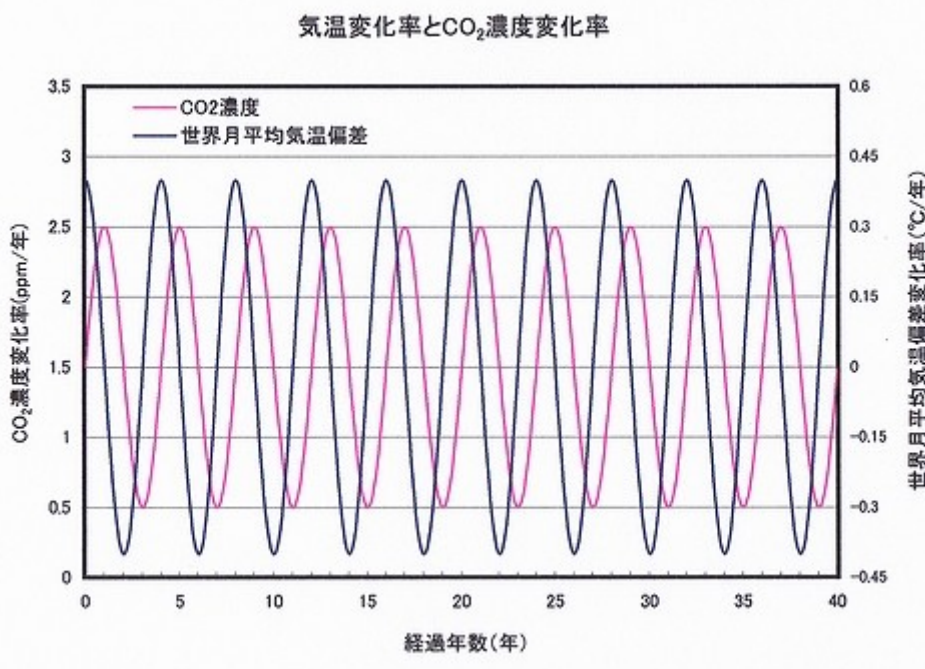
2-3 Keeling 曲線を検証する

前節までの検討から、Keeling 曲線の意味は理解できたものと思います。そこで、私たちは Keeling 曲線を再現するだけでなく、Keeling の取り除いた長期的な傾向までを含めた関係を調べることにしました。そのために使った手法は CO₂ 濃度と気温偏差について直接比較するのではなく、両者の変化率＝微分係数を比較することです。

まず、周期変動関数の微分に関する性質を見ておくことにします。例として sin 関数を考えます。sin 関数は周期 2π の周期変動関数です。sin 関数には微分に関して次の性質があります。

$$[\sin(x)]' = \cos(x) = \sin(x + \pi/2)$$

つまり、sin 関数を微分した関数は曲線の形は変わらずに位相が $\pi/2$ 、つまり 1/4 周期だけ進むのです。グラフに描けば座標軸の負の方向に 1/4 周期移動することになります。



Keeling 曲線が示すように、CO₂濃度のエルニーニョ・スケールの不規則変動と世界月平均気温偏差の変動が1年程度の位相差を持つ相似形の曲線であれば、大気中 CO₂濃度と世界月平均気温偏差の両方を微分することによって得られる曲線を比較することで、その位相差を確認することが出来るはずです。

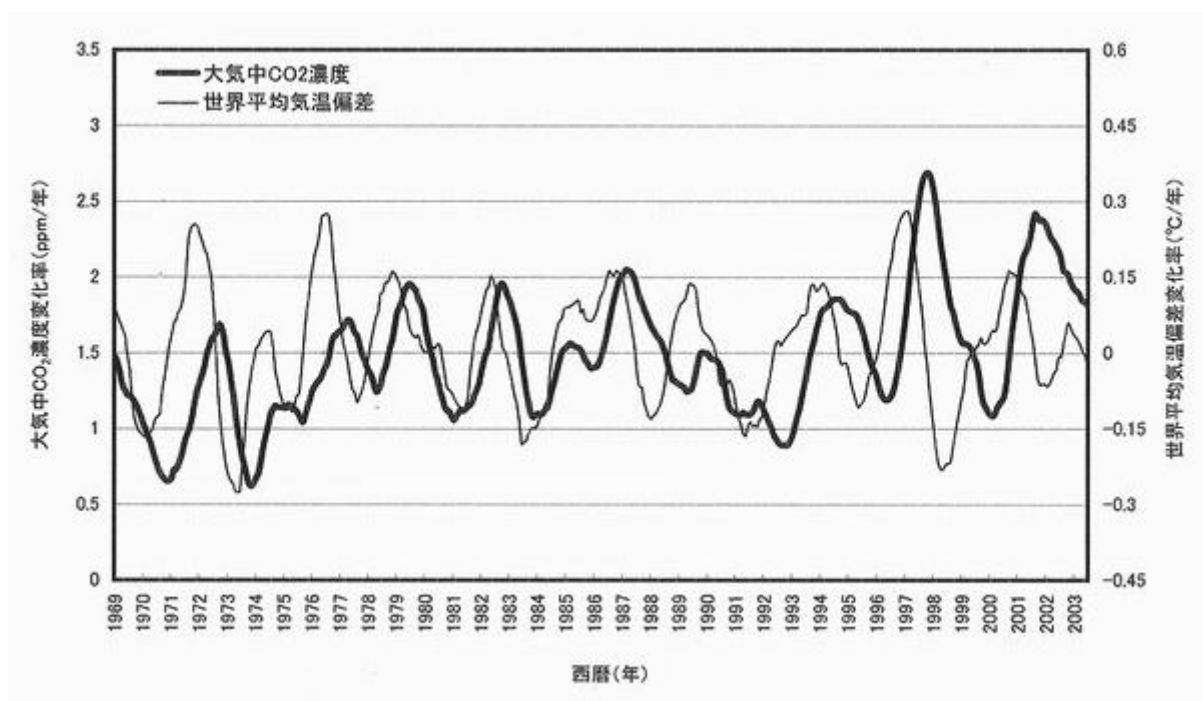
実際には、大気中 CO₂濃度について1年当たりの平均変化率 (=時間微分) を求めることにしました。前出の表現を使い、季節変動を除いた大気中 CO₂濃度を時間微分すると次のようになります。

$$[\text{大気中 CO}_2\text{濃度}]' = [315 + 1.5t + 0.8\sin[4t]]' = 1.5 + A\cos[4t], \text{ここに } A \text{ は定数。}$$

これが前頁の模式図に示した大気中 CO₂濃度の平均変化率の曲線です。注目すべき点は、この曲線の振幅の中心は1.5ppm/年、つまり大気中 CO₂濃度の長期的な上昇傾向を示していることです。

世界月平均気温偏差についても同様の平均変化率を求めたのが桃色の曲線です。こちらは元々期間の平均気温に対する偏差ですから、振幅の中心は0のままになります。

実際の Keeling の CO₂観測値と、気象庁による世界月平均気温平年差に対して平均変化率を求めたものを次図に示します。



私たちの得た平均変化率についてのグラフに対して、気象学会誌『天気』の査読者は、本質的に Keeling 曲線を追認しただけだと言う批判を行いました。しかしこれは全くこのグラフの意味を理解していないのです。

Keeling のグラフでは、CO₂濃度の長期的な変動傾向を取り除いているため、CO₂濃度の変動を再現することは出来ません。しかしこのグラフは長期的な傾向を含んだものであり、ここに示した CO₂濃度変化率の曲線を積分することによって季節変動を除いた CO₂濃度の変動を再現することが出来るのです。

このグラフから、まず **Keeling** 曲線同様に、気温変動が先に起こり、1 年程度遅れて大気中の CO_2 濃度が変動することが分かりました。つまり、気温変動が原因となって、結果として大気中 CO_2 濃度の変動が起こっていることが確認されたのです。

更にこのグラフから明らかになったことは、二つの曲線の振幅の中心の値を比較することによって、気温が変化しないときにおいても大気中 CO_2 濃度は年率 1.5ppm で増加することが示されたのです。これは重大な意味を持っています。仮に、 CO_2 地球温暖化仮説が主張するように、大気中の CO_2 濃度の変化によって気温が変化するのであれば、 1.5ppm の CO_2 濃度上昇があれば気温も上昇するはずではないでしょうか？つまり、 CO_2 地球温暖化仮説はここに完全に破綻したのです。

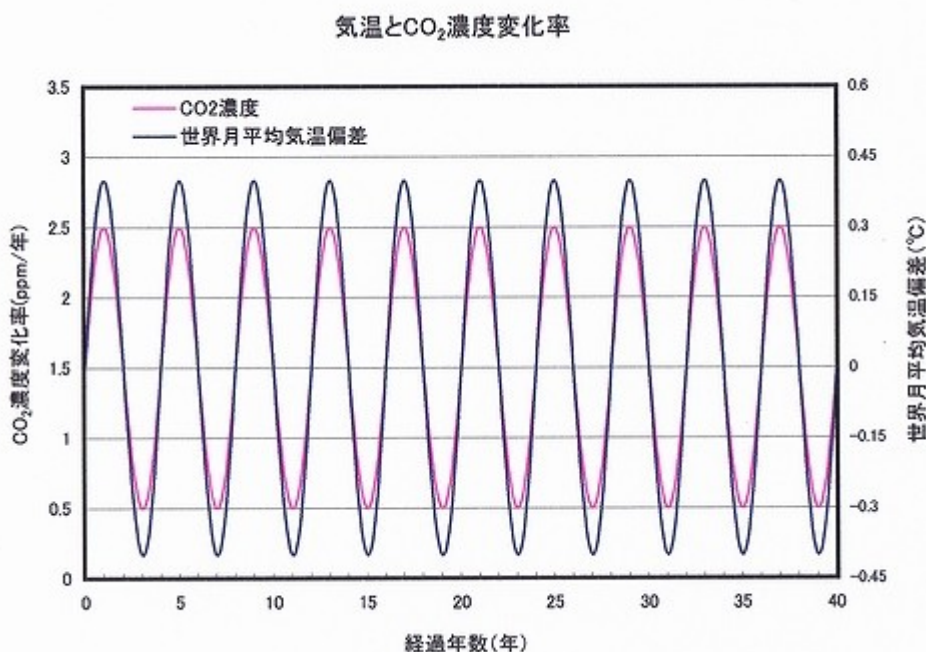
さて、二つの物理量が時間軸において位相差をもって相似な形状で現われる不規則変動関数の場合、この二つの物理量の間にはどのような関係が考えられるのでしょうか？まず一つは原因となる物理量の変化がもう一つの物理量の変化として現われる過程が複雑で、原因の発生から結果の発生までに遅れが生じる場合です。しかしこれ以外の場合もあります。例えば、原因となる物理量の変化がもう一方の物理量の時間変化率に関係する場合です。

槌田氏は、このグラフの観察から二つの重要な発見をしました。

まず、前述の通り、気温偏差の変化率が 0 の場合においても CO_2 濃度変化率は 1.5ppm/年 の値を示し、気温偏差の変化率が正の場合には更に CO_2 濃度変化率は大きくなり、逆に負の場合は小さくなることです。このことから槌田氏は、気温の変化率ではなく、気温そのものが CO_2 濃度変化率と関連していると予想しました。

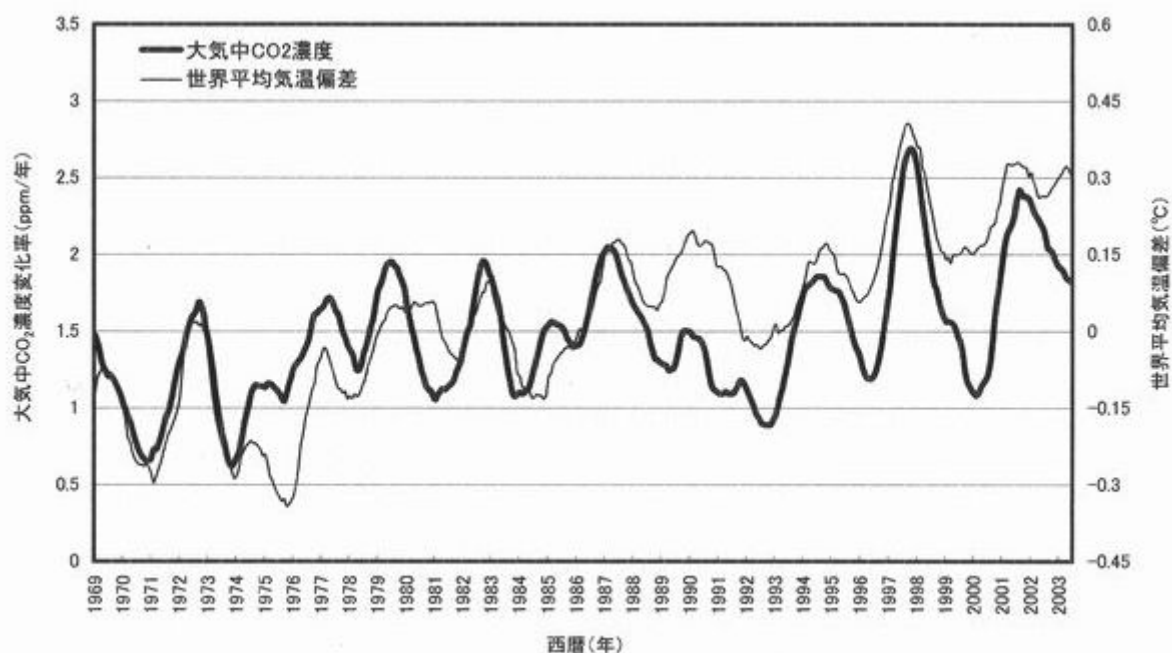
更に、両曲線間の位相差に注目し、世界月平均気温偏差の変化率の 0 点が CO_2 濃度変化率の極値に対応しているのではないかと予測したのです。

2-4 CO_2 濃度の上昇の原因は高温状態



槌田氏の指摘にしたがって、世界月平均気温偏差そのものと大気中 CO₂ 濃度変化率を比較することにしました。世界月平均気温偏差は、世界月平均気温偏差の時間に対する変化率を逆に積分することに相当します。微分の逆操作なので 1/4 周期だけ位相が戻ることになります。つまり、気温偏差の変化率を示す曲線を時間軸の正方向に 1/4 周期だけ移動することになります。

大気中 CO₂ 濃度と世界月平均気温偏差の特徴的な変動周期はばらつきがあるものの 4 年周期程度、大気中 CO₂ 濃度と世界月平均気温偏差との位相差は 1 年程度です。つまり、世界月平均気温偏差を表す曲線と大気中 CO₂ 濃度の変化率を表すグラフは前頁の模式図に示すように位相差無く重なる＝同期するはずですが、実際のデータについて求めたグラフを次図に示します。



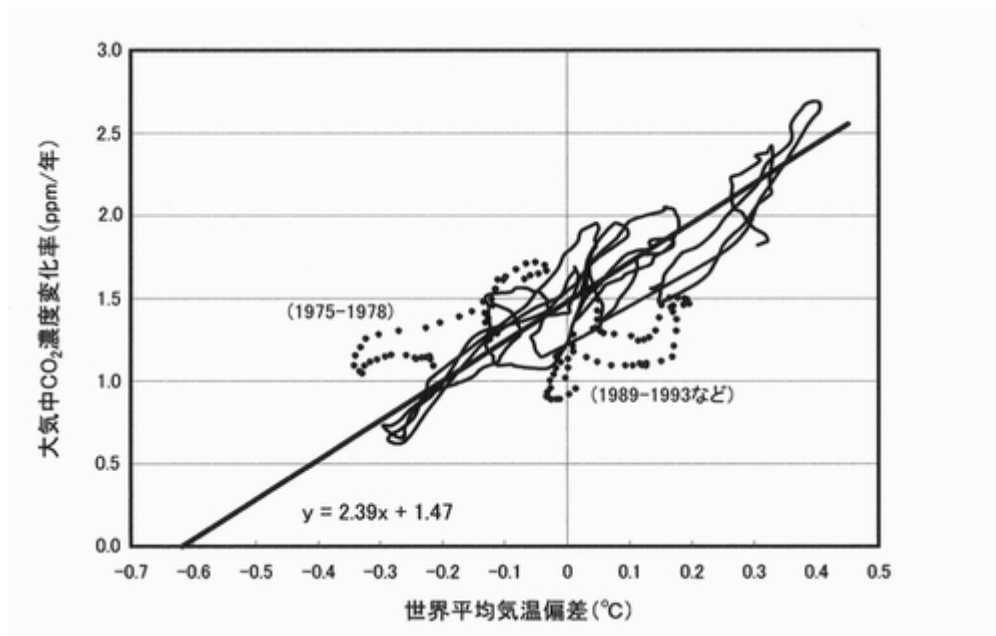
図に示すように、世界月平均気温偏差と大気中 CO₂ 濃度変化率を表す曲線は見事に同期することが分かります。つまり、気温と大気中 CO₂ 濃度の変化率の間に線形の関数関係があると解釈することが出来ます。この関係をもう少し詳しく見るために、同じデータに対する散布図を次頁に示します。

散布図に対する回帰直線から、大気中 CO₂ 濃度変化率を表す関数 y は世界月平均気温偏差 x を独立変数とする一次関数として $y = 2.39x + 1.47$ と表すことが出来ます^{註)}。

註) 形式的には気温を大気中 CO₂ 濃度の時間変化率を独立変数として表現することも出来ます。しかしこれは現象的には非常に考えにくいことです。CO₂ 地球温暖化仮説に立つならば、あくまでも大気中の CO₂ 濃度そのものが気温に関係付けられなければなりませんから、この場合は CO₂ 地球温暖化仮説以外の説明が必要になります。私にはそのような説明を想像することが出来ません。

この一次関数の y 軸の切片である 1.47ppm/年は、気温が平均気温 (1971~2000 年の 30 年平均値) に等しいときには大気中 CO₂ 濃度は年率 1.47ppm 上昇することを示してい

ます。x 軸の切片である -0.62°C は、気温が平均気温よりも 0.62°C 低ければ大気中 CO_2 濃度は変化せず、定常状態になることを示しているのです。



以上から、私たちの分析対象期間（1969～2004 年の 35 年間）について、大気中の CO_2 濃度が年率 1.5ppm 程度の上昇傾向を示している原因は、この間の気温が CO_2 濃度が定常状態になる気温よりも平均的に見て 0.6°C ほど高温状態で推移したためだと考えられます。

Keeling 曲線が示した『気温変動が大気中 CO_2 濃度の変動成分の変動に先行する』という関係は、気温が大気中 CO_2 濃度の時間に対する変化率を変化させているという関係を得る重要な手がかりを示唆したものでした。そしてこの結果は、南極の氷柱の分析などによって示されたのと同様に、現在においても気温が高くなることによって結果として大気中の CO_2 濃度が高くなることを示したのです。 CO_2 地球温暖化仮説は幻想だったのです。

3. 結論と考察

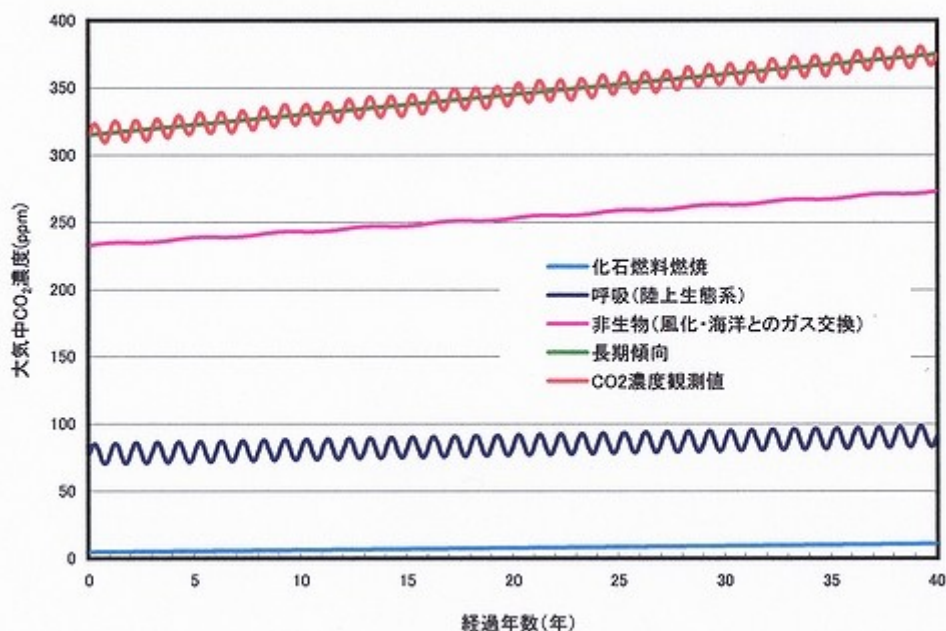
まず、大気と地表環境との間で CO_2 がどのように移動するのかを合理的に表すモデルを検討しました。その結果、大気中に存在する全ての CO_2 が同じ確率で地表環境に吸収されるという循環モデル以外に合理的なモデルは無いことを示しました。

循環モデルでは、年間吸収率が非定常に変化すると考えられますが、等比級数の形で表現される大気中の CO_2 濃度は近い過去の影響程大きく、遠い過去の影響は小さくなります。その結果、大気中の CO_2 濃度の構成比率は着目年次の地表環境の CO_2 排出源毎の排出量比率で近似的に推定できます。人為的 CO_2 排出＝化石燃料の燃焼量の影響のように単調に増加する場合は、着目年における排出量比率を用いて推定した値は多少大きめに見積もった推定値になります。

この結果を用いて推定した最近 40 年間の大気中 CO₂ 濃度構成を再掲しておきます。

	現在値		40 年前	
	年間排出量	大気中濃度	年間排出量	大気中濃度
化石燃料燃焼	6Gt/年	10.9ppm	3Gt/年	4.7ppm
呼吸（陸上生態系）	50Gt/年	91.0ppm	50Gt/年	77.6ppm
非生物（風化・海洋とのガス交換）	150Gt/年	273.1ppm	150Gt/年	232.8ppm
合計	206Gt/年	375ppm	203Gt/年	315ppm
年間吸収率	0.242		0.278	

大気中CO₂濃度の構成



この結果から明らかなように、現在大気に含まれる人為起源の CO₂ 量は、最大でも全体の $6/206 \approx 3\%$ にも満たないのです。

Keeling 曲線に表された CO₂ 濃度変動から取り除かれた長期傾向（上の図の緑で示した線に対応します）＝人為的な CO₂ の蓄積量という気象学会誌『天気』の河宮氏の主張や、これを踏襲する標準的な人為的 CO₂ 地球温暖化仮説は科学的な考察を怠り『人為的 CO₂ 蓄積説』を妄信した結果、大きな誤りを犯しているのです。

今回示した内容は、エントロピー増大則、IPCC による炭素循環、Keeling の CO₂ 観測値だけから一体何が結論できるのかを検討してきました。その結果、私たちの分析対象期間において大気中 CO₂ 濃度の時間変化率が気温の一次関数として近似できることが分かりました。CO₂ 濃度が増加傾向を示しているのはこの間の気温が CO₂ 濃度が定常状態になる気温よりも 0.6℃ほど高めに推移していることが原因なのです。

ここまでの議論は事実以外のことには出来るだけ触れずに進めてきましたが、最後に少し推論してみることにします。気温が高くなったことによってどうして大気中の CO₂ 濃度

が高くなるのか？具体的な現象を考えてみることにします。

循環モデルの中で変化する要因は、地表環境の CO₂ 排出源の変動（構成比と絶対量）と地表環境の吸収率の二つです。ここまでは議論を単純化するために、排出源については化石燃料燃焼以外では年間 CO₂ 排出量は変化しないものとしてきましたが、実際には少なからず変化していると考えられます。

まず排出源から考えてみます。炭素循環図から排出源は影響の大きい順に、海洋のガス交換（90Gt）、陸上における土壌風化（60Gt）、陸上生態系の呼吸（50Gt）そして化石燃料燃焼（6Gt）です。この中で、化石燃料燃焼以外は全て気温上昇によって CO₂ 放出量が増加すると考えられます。

しかし、呼吸については単純に増加するとは言いきれません。近年の森林の減少、砂漠化の進行によって生態系が全体として縮小傾向にあるためです。

以上から、気温上昇によって排出量が確実に増加するのは海洋におけるガス交換と陸上における土壌風化です。冒頭に示した大気中 CO₂ 濃度の構成の中では、この二つを併せて『非生物』として分類しています。元々構成比率の最も高い非生物系ですから、気温変化に対する CO₂ 排出量の最大の変動要因だとして間違いないと思います。

次に吸収源について考えることにします。吸収源は影響の大きい順に光合成（110Gt）、海洋のガス交換（90G t）に二分されます。

光合成の活性度は気温が上昇することによって高くなります。また、気温上昇による生育域の増加の可能性もあります。一方、前述のように森林の減少や砂漠化の進行が進んでいます。この相反する影響がどうなるかを判断するだけのデータを知りませんので、これについては意見を保留しておきます。

海洋のガス交換につきましては、気温の上昇は吸収率の減少につながります。

以上から、CO₂ 排出源であり同時に CO₂ 吸収源である地表面＝大気との接触面の 7 割にも及ぶ海洋の気温による特性の変化が気温上昇に伴う大気中 CO₂ 濃度の上昇の最大の要因だと考えられます。次に重要なのは生態系の活性度（呼吸と光合成）の評価ですが、これについては極めて複雑な生態系の状態を把握することが必要であり、評価はかなり困難であろうと思います。

(2008/12/26)

参考レポート

- 新版 Keeling のグラフ解釈に対する考察 (2008/03/11)
- 「CO₂を削減すれば温暖化は防げるのか」を巡る議論
人為的二酸化炭素地球温暖化仮説を否定する (2007/12/05)
大気中に含まれる人為起源二酸化炭素量の推計 (2008/01/15)
- 離散的データによる自然現象の把握について (2008/06/02)
- 総括 気温変動と大気中 CO₂ の関係 (2008/10/13)

CO₂ 観測データ

- Atmospheric CO₂ concentrations (ppmv) derived from flask and in situ air samples collected at the South Pole (<http://cdiac.ornl.gov/ftp/trends/co2/sposio.co2>)
- Atmospheric CO₂ values (ppmv) derived from in situ air samples collected at Mauna Loa, Hawaii, USA (<http://cdiac.ornl.gov/ftp/trends/co2/maunaloa.co2>)