

高校生のための地球温暖化論
温暖化は人為的な影響ではない

2016.7.

近 藤 邦 明

はじめに

数年前、私の娘が通った大分県の県立高校の使用していた教科書や補助教材の温暖化やオゾンホールなどを中心とする環境問題関係の内容を見る機会を得ました。その結果、高校教科書の環境問題の記述は、自然科学に基づいた内容ではなく、政治や経済によって捻じ曲げられていることが分かりました。

娘の通う高校の理科の教師たちは、自らが教科として教えている化学や物理の内容と明らかに矛盾している環境問題に関する記述に対して、一切の考察を放棄して、『国定教科書』の記述を戦前の上意下達の洗脳教育さながらに垂れ流していることを知りました。

高校生は学校教育によって、おそらく、地球温暖化といえは産業革命以降に化石燃料の消費によって人為的に放出した二酸化炭素が大気中に蓄積し、その付加的な温室効果によって起こる現象だと『信じて』いるのではないかと思います。また、それは自然科学的に確認されていると『信じて』いるのではないかと思います。

しかし、実際には人為的¹二酸化炭素地球温暖化説は、自然科学的には極めて出来の悪い仮説に過ぎません。高校の教育課程で教えられる化学、物理、地学の範囲で、人為的¹二酸化炭素地球温暖化仮説の自然科学的な誤りを指摘することは難しいことではありません。

人為的¹二酸化炭素地球温暖化仮説は、独立の2つの自然科学的な仮説から成り立っています。一つは、産業革命以降に観測されている大気中二酸化炭素濃度上昇の主要な原因が、化石燃料の消費によって人為的に放出した二酸化炭素が大気中に『蓄積した』ことであるという、「人為的¹二酸化炭素蓄積仮説」です。そしてもう一つが、大気中の二酸化炭素濃度の上昇による付加的な温室効果が近年観測されている気温上昇の主因だとする「二酸化炭素地球温暖化仮説」です。人為的¹二酸化炭素地球温暖化仮説が成立するためには、2つの独立の仮説が同時に正しい時にのみ成立します。

本稿は、高校の化学の知識内で、「人為的¹二酸化炭素蓄積仮説」が自然科学的に成立し得ない非論理的な主張であることを示すことで、人為的¹二酸化炭素地球温暖化仮説が誤りであることを示す目的で、2016年7月にホームページに連載した「高校生でも分かる人為的¹温暖化の誤り」を基に、内容を整理したものです。

願わくは、沢山の高校生の皆さんの偏見のない目で、人為的¹二酸化炭素地球温暖化仮説について先入観を持たずに考えていただきたいと思います。そして友人や学校の理科の教師と人為的¹二酸化炭素地球温暖化仮説について、「自然科学」の問題として議論していただければ幸いです。

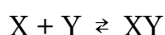
自然科学の本質とは、『信じる』ことではなく、疑問を持つこと、疑うことだということを身につけて欲しいと考えます。

§1 炭素循環を理解するための化学の基礎

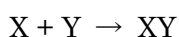
1-1 気体溶解度に対する温度効果とヘンリーの法則

可逆反応と不可逆反応

例えば、2つの物質 X と Y があるとします。物質 X と Y を一つの容器で混ぜあわせると、化合物 XY が生成するとします。一般的に、物質 X と Y が化合物 XY を作るのに過不足無く混合しても容器内が全て化合物 XY にはならず、物質 X と物質 Y、そして化合物 XY が一定の比率で存在する状態で変化が止まります。これは、反応が起こらなくなったわけではなく、物質 X と物質 Y から化合物 XY ができる正反応と、化合物 XY が物質 X と物質 Y に分解する逆反応が同時に起こっているからです。このように、正反応と逆反応が同時に起こる化学反応を可逆反応と呼びます。



これに対して、正反応だけが一方的に進むような化学反応を不可逆反応と呼びます。



反応速度と化学平衡、質量作用の法則

可逆反応 $X + Y \rightleftharpoons XY$ の正反応（左から右へ進む反応）について考えます。反応物 X、Y の濃度をそれぞれ $[X]$ 、 $[Y]$ で表すものとします。反応系の温度が変化しない場合、正反応の反応速度 v_1 は k_1 を比例定数として、反応物 X、Y の濃度 $[X]$ 、 $[Y]$ の積に比例します。

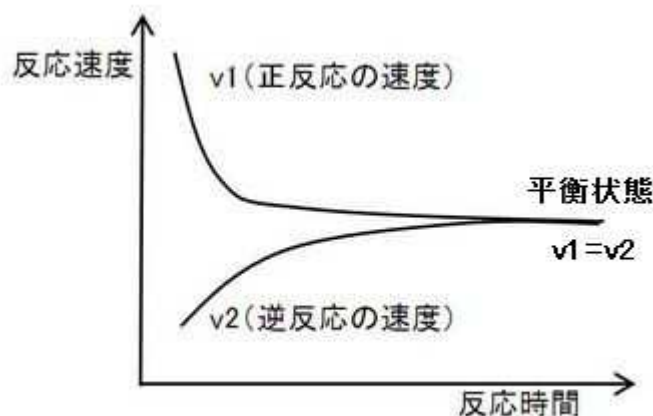
$$v_1 = k_1[X][Y]$$

同様に逆反応の速度 v_2 は、

$$v_2 = k_2[XY]$$

k_1 、 k_2 は温度などによって定まる定数であり、「速度定数」と呼びます。

反応物 X と Y の場合、はじめの段階では生成物 XY は全く無く正反応だけが進行します。反応が進むと $[X]$ と $[Y]$ が減少し、 $[XY]$ が増加します。それにともなって正反応速度 v_1 は次第に小さくなり、逆反応速度 v_2 は大きくなります。ある程度時間が経過すると $[X]$ 、 $[Y]$ 、 $[XY]$ は一定の値になり変化しなくなります。この状態を化学平衡と呼びます。



これは反応が止まってしまったのではなく、正反応の速度 v_1 と逆反応の速度 v_2 が等しくなったことを示しています。したがって化学平衡では次式が成り立ちます。

$$v_1 = k_1[X][Y] = v_2 = k_2[XY]$$

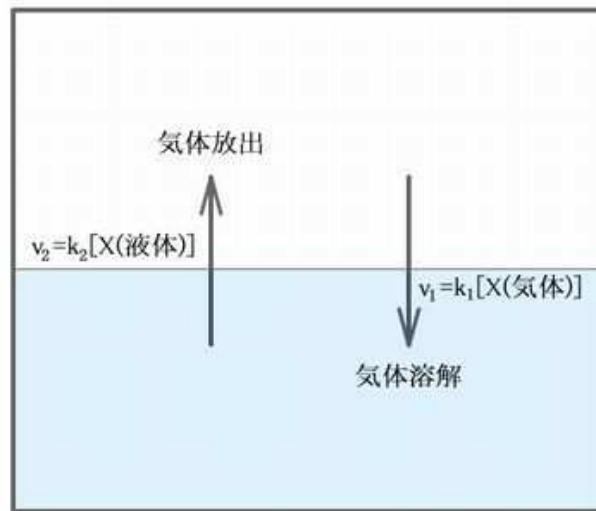
反応系の温度が一定の場合、正反応の速度定数 k_1 と逆反応の速度定数 k_2 の比率を平衡定数 K と定義します。 K は平衡状態の反応物と生成物の濃度で表すことが出来ます。

$$K = \frac{k_1}{k_2} = \frac{[XY]}{[X][Y]}$$

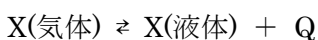
一般に、ある温度における化学平衡を表す平衡定数 K は、反応に関わる物質の濃度によって定まります（特に濃度平衡定数という場合もある）。これを質量作用の法則と呼びます。

気体の水への溶解反応

気体の水への溶解反応を考えます。ここで扱う気体はメタン CH_4 や二酸化炭素 CO_2 などの水に対する溶解度があまり高くないものとします。



図に示すように、水と気体が接しているような系を考えます。気体物質 X の水への溶解反応を正反応、水に溶けていた物質 X が気体となって放出される反応を逆反応だとします。一般に、気体の水への溶解反応は発熱反応になるので、反応熱 $Q > 0$ として反応式は次のように表すことが出来ます。

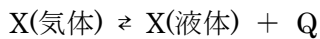


ルシャトリエの法則と大気中 CO_2 濃度

化学平衡にある系に対して、何らかの変化を与えると、系の平衡状態は加えた変化を緩和する方向に遷移します。これをルシャトリエの法則といいます。大気中 CO_2 濃度に関係する幾つかの例を示しておきます。

①平衡系に熱を加えた場合：

気体の水への溶解反応は発熱反応でした。



いま化学平衡にある系に熱を加えると、系は温度の上昇を小さくする方向、つまり吸熱反応である逆反応（右から左方向）が進む方向に遷移します。

したがって、化学平衡にある系において溶液の温度を上げると溶液から X(気体)の放出が増え、[X(気体)]が増加する方向に化学平衡が遷移することになります。

②気体濃度が増える場合：

気体 X の水への溶解反応では、

$$\text{正反応速度： } v_1 = k_1[X(\text{気体})],$$

$$\text{逆反応速度： } v_2 = k_2[X(\text{液体})]$$

平衡状態では、平衡定数 K は次のように表すことができます。

$$K = \frac{k_1}{k_2} = \frac{[X(\text{液体})]}{[X(\text{気体})]}$$

温度が変わらなければ平衡定数 K は一定の値を取ります。

化学平衡にある系に、系外から X(気体)を吹き込むと気体 X の濃度[X(気体)]が大きくなります。その結果、化学平衡が破れて[X(気体)]に比例する正反応速度 v_1 が大きくなり、水への溶解反応が進み、[X(気体)]が減少して[X(液体)]が増加します。そして再び、化学平衡を回復します。

初期状態の気体 X の濃度を[X₀(気体)]、遷移した新たな化学平衡状態の濃度を[X₁(気体)]で表すと次の関係があります。

$$[X_0(\text{気体})] < [X_1(\text{気体})]$$

ヘンリーの法則

気体については気体の状態方程式が成り立ちます。今、X(気体)の圧力を P、体積を V、温度を T、モル数を n、気体定数を R とすると次式が成り立ちます。

$$PV = nRT \quad \therefore [X(\text{気体})] = \frac{n}{V} = \frac{P}{RT}$$

したがって、

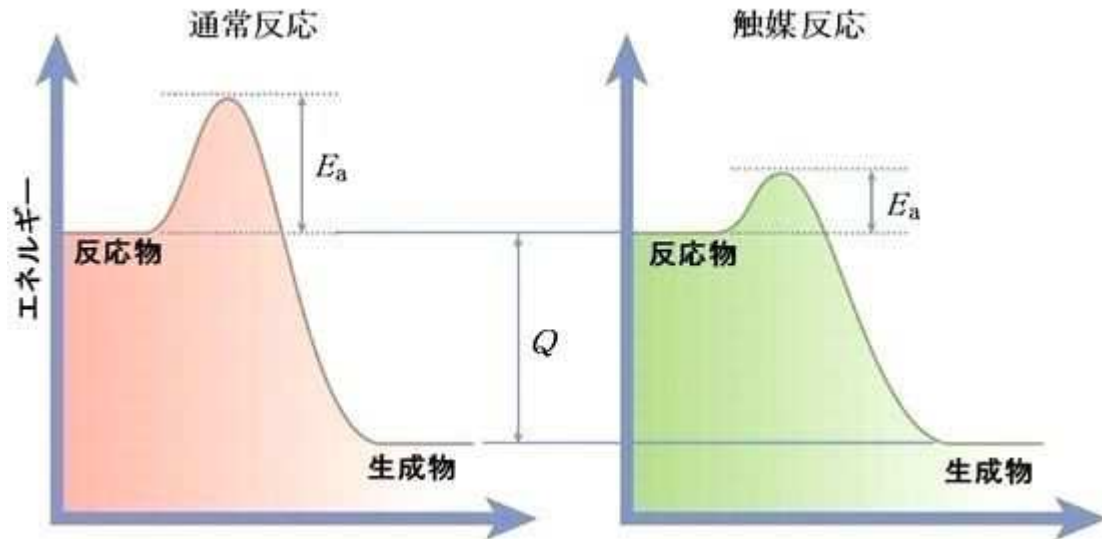
$$[X(\text{液体})] = K[X(\text{気体})] = \frac{K}{RT}P$$

上式から、気体温度 T が一定であれば、気体の液体への溶解度は気体の圧力 P に比例することがわかります。これをヘンリーの法則と呼びます。

1-2 活性化エネルギー、温度と速度定数

活性化エネルギーと触媒反応

化学反応が起きるとき、反応物質はエネルギー的に一旦励起されることが必要です。



上図は、物質の持つエネルギー状態が化学反応の進行にともなってどのように変化するかを模式的に表したものです。縦軸がエネルギー量、横軸が反応の進行方向を示しています。

左側の図について考えます。化学反応が進行するためには反応物は基底状態から一旦 E_a だけ励起されなければなりません。この E_a のことを活性化エネルギーといいます。活性化エネルギーを得た反応物は化学反応によってエネルギー的に安定な生成物になります。このとき、反応物の持っていたエネルギーよりも生成物のエネルギーが小さい場合には余分なエネルギー Q を反応熱として放出します。上図は発熱反応です。

逆反応（右から左に反応が進行する場合）では、活性化エネルギーは $(Q+E_a)$ になります。逆反応では反応前のエネルギーのほうが小さいので反応熱は $-Q$ になるので吸熱反応になります。

注意すべきことは、たとえ発熱反応であっても無条件に反応が進むわけではなく、一旦活性化エネルギーを超えるために励起されることが必要だということです。

右の図は同じ化学反応について、反応を促進する触媒がある場合です。触媒は反応の前後の状態を変化させることはありませんが、活性化エネルギー E_a を小さくすることで反応の進行を促進します。

アレニウスの式

アレニウスは温度 T における化学反応速度を推定する目的で速度定数を次のように表しました。

$$k = Ae^{-\frac{E_a}{RT}}$$

ここに、 A は温度とは独立の定数であり、一般に頻度因子と呼ばれています。この式は、温度 T における速度定数 k を気体の分子運動論から考えて、気体分子の持つ運動エネルギーが活性化エネルギー E_a よりも高くなる確率に比例することを示しています。

指数部分 $(-E_a/RT) < 0$ から、速度定数は反応の活性化エネルギーが小さく、温度 T が大きいほど大き

な値になることを示しています。つまり、化学反応は一般的に触媒を用いて温度を高くするほど反応速度が大きくなります。

以上で、地球大気に含まれる溶解度の大きくない気体の挙動を考察するために必要な基本的な化学の知見の整理ができました。重要な内容をまとめておきます。

- ①化学平衡にある系に対して何らかの変化が生じると、変化を緩和する方向に平衡が遷移する（ルシャトリエの法則）。
- ②化学反応の速度定数は活性化エネルギーが小さく温度が高いほど大きくなる。
- ③気体の水への溶解反応は発熱反応であり、反応系の温度が上昇するほど気体濃度を高くする方向に化学平衡が遷移する。
- ④気体の水への溶解反応では、反応系の温度が不変であれば、気体濃度が高いほど水への溶解度が大きくなる（ヘンリーの法則）。

§2 氷期-間氷期サイクルと大気中の気体濃度

2-1 大気組成と大気中 CO₂ の炭素重量

対流圏の乾燥大気の組成

地球大気はいろいろな気体から構成された混合気体です。現在の乾燥した地球大気の組成の概略は次の通りです。

成分	化学式	体積比 割合 (vol%)	ppm
窒素	N ₂	78.084	780,840
酸素	O ₂	20.9476	209,476
アルゴン	Ar	0.934	9,340
二酸化炭素	CO ₂	0.0390	390
ネオン	Ne	0.001818	18.18
ヘリウム	He	0.000524	5.24
メタン	CH ₄	0.000181	1.81

対流圏では大気の大気対流運動と地球規模の大循環によって、急速に攪拌され一様に混合が進みます。その結果、対流圏における乾燥大気の組成はどこでもほとんど同じ値を使うことができます。

対流圏大気に含まれる CO₂ の化学平衡

気体の溶解反応について、気体が水に溶け込む速さは次式で表されることを述べました。

$$v_1 = k_1[X(\text{気体})]$$

大気をめぐる二酸化炭素 CO₂ については、含まれる炭素 C の重量で表すことが多いので、上式を書き換えることにします。CO₂ の溶解の反応速度 v_1 (単位は mol/sec : 1 秒間あたりに水に溶解する CO₂ の mol 数) の代わりに q_1 (単位は Gt/yr : 1 年間あたりに水に溶解する CO₂ に含まれている C の重量) を使うことにします。

$$\text{※ Gt(ギガトン)} = 1 \times 10^9 \text{t(トン)} = 1 \times 10^{15} \text{g(グラム)}$$

$$\begin{aligned} q_1 &= v_1(\text{mol/sec}) \times 12(\text{g/mol}) \times 3600(\text{sec/hour}) \times 24(\text{hour/day}) \times 365(\text{day/yr}) \\ &= 3.78 \times 10^8 \times v_1(\text{g/yr}) \\ &= 3.78 \times 10^{-7} \times v_1(\text{Gt/yr}) \equiv A_1 v_1 \quad \text{ただし、} A_1 \text{ は比例定数} \end{aligned}$$

$$\therefore v_1 = q_1/A_1$$

同様に、着目する気体の濃度は、モル濃度 $[X(\text{気体})]$ (単位は mol/litre) の代わりに体積濃度を使います。1 気圧標準状態で 1 mol は 22.4 litre なので、

$$\begin{aligned} \text{体積濃度} &= [\text{X(気体)}](\text{mol/litre}) \times 22.4(\text{litre/mol}) \times (10^6 \text{ppm}) \\ &= 2.24 \times 10^7 [\text{X(気体)}](\text{ppm}) \equiv A_2 [\text{X(気体)}] \quad \text{ただし、} A_2 \text{は比例定数} \end{aligned}$$

大気中の CO₂ 濃度は高々 390ppm と低濃度なので、体積濃度は近似的に大気中に含まれる CO₂ 量に比例するとして差し支えありません。大気中の CO₂ 量を炭素重量で Q(Gt) で表せば、

$$A_2 [\text{X(気体)}] \doteq A_3 Q \quad \text{ただし、} A_3 \text{は比例定数}$$

$$\therefore [\text{X(気体)}] \doteq (A_3/A_2) Q$$

以上の関係を使うと、

$$v_1 = q_1/A_1 = k_1 [\text{X(気体)}] = k_1 (A_3/A_2) Q$$

$$\therefore q_1 = k_1 (A_1 A_3/A_2) Q \equiv r Q \quad \text{ただし、} r = k_1 (A_1 A_3/A_2) \text{は比例定数}$$

つまり、大気中に含まれている量が少なく、比較的水に対する溶解度が小さな気体である CO₂ の溶解速度 q_1 は、大気中に含まれている CO₂ 量 Q に比例するのです。比例定数 r は速度定数 k_1 に比例するので、温度が高くなるほど大きくなります。

今、1年間に海から大気中に放出される CO₂ 量を q_2 とすれば、平衡状態では次の関係が成り立ちます。

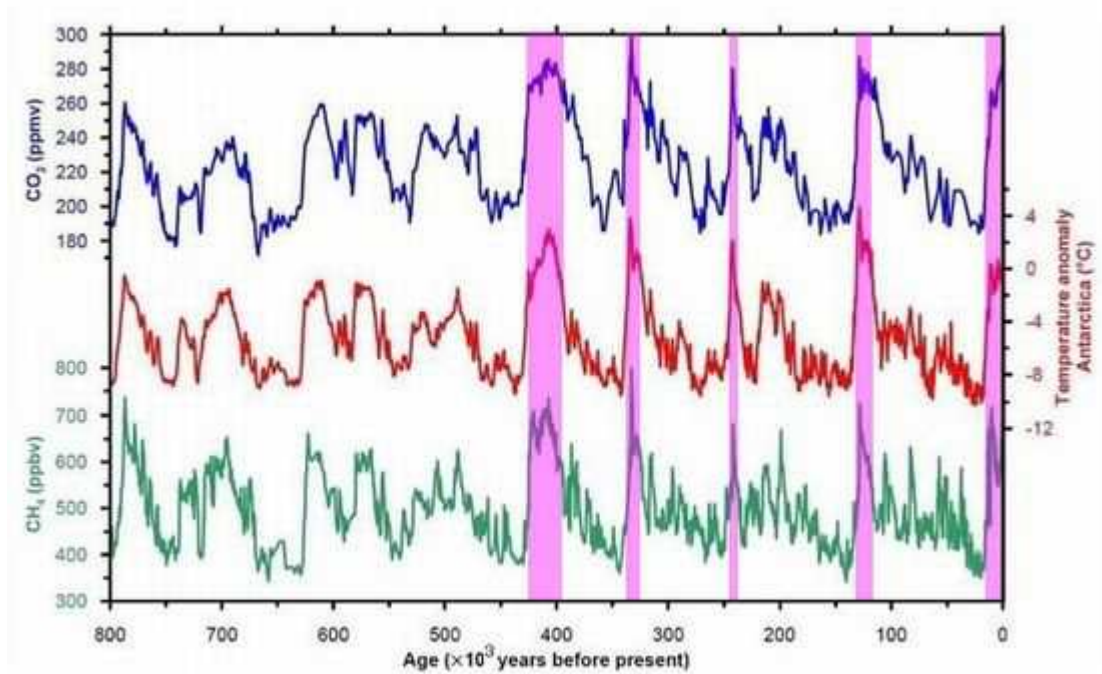
$$q_1 = q_2 = r Q$$

大気中の CO₂ 濃度は有限確定値として測定可能です。近年の大気中 CO₂ 濃度の変動速度は 1.5ppm/yr 程度です。大気中 CO₂ 濃度を 390ppm と仮定すると変動率は $1.5/390 = 0.004/\text{yr} = 0.4\%/\text{yr}$ 程度です。したがって、Q の遷移速度は十分に遅く、現象は準定常的だと考えられるので、あらゆる場合について上式を用いて考察して問題ありません。

2-2 氷期-間氷期サイクルの気温変動と大気中 CO₂ 濃度

南極氷床コアの分析結果

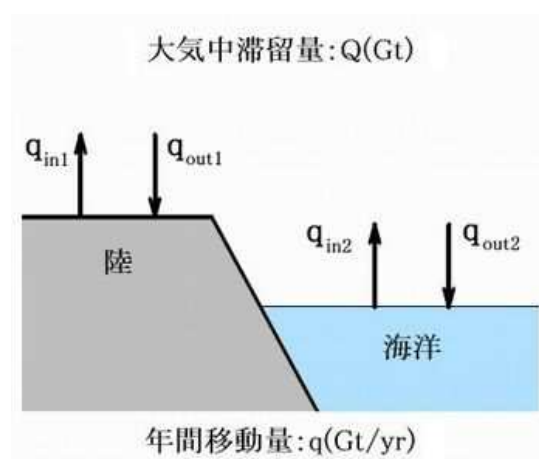
具体的に地球大気に含まれる CO₂ 濃度がどのように変動してきたのかを、南極の氷床コアの分析結果で見ることにします。



上図から、赤で示す気温変動と大気中の CO₂ 濃度、さらにメタン CH₄ 濃度が大変よく同期して変動していることがわかります。これは、比較的水に溶けにくい気体の水に対する溶解反応が発熱反応なので、気温ないし海洋表層水温が上昇すれば、逆反応である海洋からの気体放出が大きくなる方向に化学平衡が遷移するためです（ルシャトリエの法則）。この点については、人為的 CO₂ 地球温暖化論を主張する気象学者も同意しています。

平衡状態を調整する海洋の機能

地球には海洋だけではなく陸地があります。単純に気体の水に対する溶解反応のアナロジーとして理解してもよいのでしょうか？



陸上では動植物の生物活動や無機的な風化や火山活動などが CO₂ の放出・吸収に関与しています。海洋部分と陸上部分の担う放出・吸収量はほぼ同じ程度です（IPCC2007 年炭素循環図参照）。

陸上の主要な CO₂ 放出現象は生物の呼吸であり、吸収現象は光合成です。呼吸や光合成という生物反応も気温が上昇すれば活発になります。また光合成は大気中の CO₂ 濃度が高くなるほど活発になります。しかし陸上生態系には、短期的には、呼吸で放出する CO₂ 量と光合成によって吸収する CO₂ 量が等しくなるような調整能力はありません。風化や火山活動も同様です。

陸上環境における CO₂ の収支が釣り合わない場合はどうなるのでしょうか？例えば呼吸による放出が光合成による吸収を上回る場合には、大気中の CO₂ 濃度が上昇します。

海洋部分では大気中 CO₂ 濃度に比例する CO₂ の海洋への溶解速度が大きくなり、呼吸によって上昇した大気中の CO₂ 濃度の変化を小さくする方向に化学平衡が遷移することによって調整されます（ヘンリーの法則、ルシャトリエの法則）。光合成によって吸収される量が卓越する場合には逆の現象が起こって調整されます。

一般的に、海洋以外に独立した CO₂ の放出・吸収源がある場合においても、海洋の調整能力によって地球の大気中の CO₂ 濃度は常に準定常的に変動していると考えられるのです。したがって、上図の場合には次式が成り立ちます。

$$(q_{in1} + q_{in2}) = (q_{out1} + q_{out2}) = rQ$$

より一般化して、CO₂ の放出源 q_{in} 、吸収源 q_{out} が複数ある場合には次式が成り立ちます。

$$\Sigma q_{in} = \Sigma q_{out} = rQ$$

§3 炭素循環から考える大気中 CO₂ 濃度

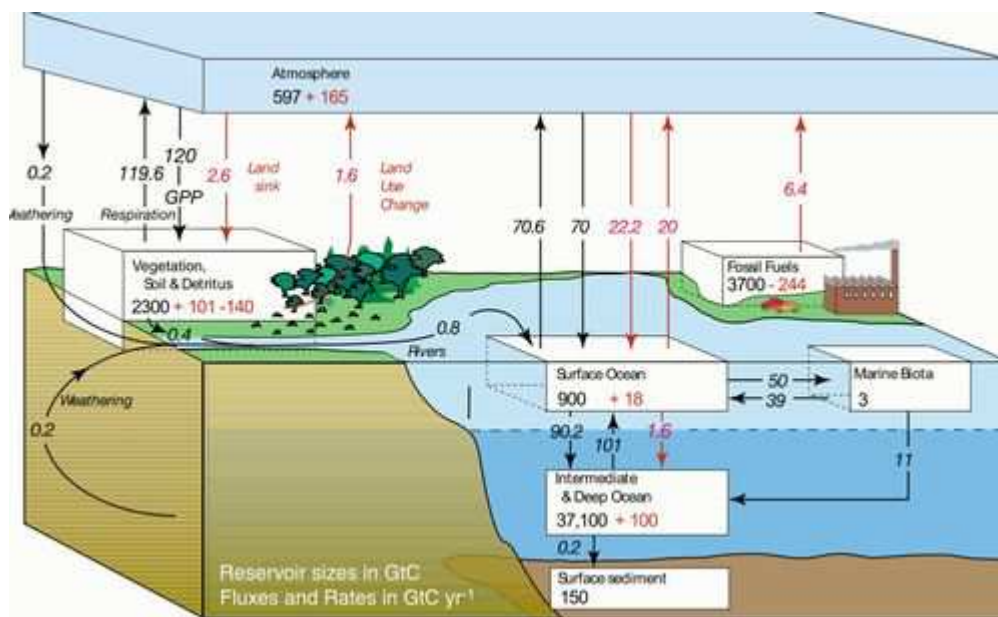
3-1 IPCC2007 年炭素循環図

比較的水に溶けにくい気体の水への溶解反応という可逆反応の化学平衡として大気中の CO₂ 量のモデルを構成しました。これまでは着目した特定の時点の量的な関係として表現していましたが、時間要素を含んでいませんでした。時間的な要素を明示的に示すと、時刻 t における一般的な関係は次のように表現することができます。

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

以下、この関係を用いて分析を進めることにします。

地球の表面環境における炭素循環については様々なものが提案されていますが、比較的新しいものとして、IPCC2007 年報告で紹介されている炭素循環図を紹介します。



図中の矢印は炭素 C の年間移動量(GtC/yr : 炭素ギガトン/年)を表し、四角の枠の中の数値は炭素 C のストック量(GtC : 炭素ギガトン)を表しています。また、黒の数値、矢印は、産業革命以前の定常状態と考えられている時代の炭素循環、赤の数値、矢印は、産業革命～現在までの変化量を示しています。この図について考察します。

産業革命以前の炭素循環

産業革命以前の定常状態を時刻 t_0 とします。

$$\Sigma q_{in}(t_0) = 119.6[\text{呼吸}] + 70.6[\text{海洋放出}] = 190.2(\text{GtC/yr})$$

$$\Sigma q_{out}(t_0) = 0.2[\text{風化}] + 120[\text{光合成}] + 70[\text{海洋吸収}] = 190.2(\text{GtC/yr})$$

$$\therefore \Sigma q_{in}(t_0) = \Sigma q_{out}(t_0)$$

$$Q(t_0) = 597(\text{GtC})$$

産業革命以前の大気中 CO₂濃度は 280ppm 程度だと言われています。したがって、気体濃度が近似的に重量に比例することから、

$$(597/280) = 2.132(\text{GtC/ppm})$$

大気中の炭素重量が 2.132Gt 増加すると CO₂濃度が 1ppm 上昇することになります。また、

$$r(t_0) = \Sigma q_{out}(t_0)/Q(t_0) = 190.2/597 = 0.3186(1/\text{yr})$$

なので、一年間に大気中 CO₂量 Q の 31.86%程度が地球環境に吸収されていたことがわかります。

現在の炭素循環

現在の時刻を t₁ とします。

$$\begin{aligned}\Sigma q_{in}(t_1) &= \Sigma q_{in}(t_0) + 1.6[\text{土地利用変化}] + 20[\text{海洋放出増加}] + 6.4[\text{化石燃料消費}] \\ &= 218.2(\text{GtC/yr})\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Sigma q_{out}(t_1) &= \Sigma q_{out}(t_0) + 2.6[\text{土地吸収}] + 22.2[\text{海洋吸収増加}] \\ &= 215.0(\text{GtC/yr})\end{aligned}$$

$$Q(t_1) = Q(t_0) + 165[\text{産業革命から現在の変化}] = 762(\text{GtC})$$

$$\text{大気中 CO}_2\text{濃度は、} 762(\text{GtC})/2.132(\text{GtC/ppm}) = 357.4\text{ppm}$$

IPCC の図からは、現在は大気への CO₂流入量 $\Sigma q_{in}(t_1)$ と流出量 $\Sigma q_{out}(t_1)$ は釣り合っておりません。不平衡量は次の通りです。

$$\Sigma q_{in}(t_1) - \Sigma q_{out}(t_1) = 3.2(\text{GtC/yr})$$

これは、人為的に大気中へ放出された CO₂の半量に対応しています。3.2GtC を大気中 CO₂濃度に換算すると、 $(3.2/2.132)=1.5\text{ppm}$ に対応します。これは 20 世紀後半に観測されている大気中 CO₂濃度の変化率 1.5ppm/yr に対応しています。

実際には年間の大気中 CO₂交換量が 215.0~218.2(GtC/yr)程度に対して、不平衡量 3.2(GtC/yr)は 1.5%程度であり、このような細かい精度で炭素循環が特定されているわけではありません。

地表面環境の炭素循環が準定常的 (=ある時々で大気中 CO₂濃度が有限確定値として観測できる程度にゆっくり) に変化している場合には、冒頭で紹介したように、一般的に次式が成立します。

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

したがって、 $\Sigma q_{in}(t) = \Sigma q_{out}(t)$ であっても、大気中 CO₂量 Q(t)は気温変化などの環境条件変化によって r(t) が変化すれば無数に異なる平衡状態が存在します。したがって、気温上昇が顕著な 20 世紀の大気中 CO₂濃度を考えるとき、大気中 CO₂濃度が年間 1.5ppm 上昇することを年間の不平衡量が 3.2(GtC/yr)であることによって説明できるというシナリオは短絡的すぎるのです。IPCC の炭素循環図は、「人為的に放出された CO₂量の半量程度が大気中に蓄積して大気中 CO₂濃度が変化する」という人為的 CO₂蓄積仮説を説明するために数値を調整しているようです。

3-2 大気中 CO₂ 濃度上昇の原因を探る

IPCC の炭素循環図の数値を元に、産業革命以降の大気中 CO₂ 濃度の変化の主要な原因を特定することにします。

産業革命前と現在の炭素循環の比較

現在は合計で、大気に放出される CO₂ 量が $(218.2 - 190.2) = 28\text{GtC/yr}$ 増加しました。増加した 28GtC/yr の内訳は表の通りです。

海洋放出増加	土地利用の変化	化石燃料消費	合計
20.0GtC/yr	1.6GtC/yr	6.4GtC/yr	28.0GtC/yr
71.4%	5.7%	22.9%	100.0%

同様に、大気から吸収される CO₂ 量が $(215.0 - 190.2) = 24.8\text{GtC/yr}$ 増加しました。増加した 24.8GtC/yr の内訳は表の通りです。

海洋吸収増加	土地吸収	合計
22.2GtC/yr	2.6GtC/yr	24.8GtC/yr
89.5%	10.5%	100.0%

産業革命前から現在の変化を比較すると、最大の変化は海洋から大気への CO₂ 放出量、大気から海洋への吸収量の増加です。これは、気体の水への溶解反応という可逆反応の化学平衡で考察した通り、産業革命前から現在までの気温＝海洋表層温度の上昇によって、吸熱反応である海洋からの CO₂ 放出が増加して大気中 CO₂ 濃度が上昇する方向に化学平衡が遷移したからです。氷期－間氷期サイクルと大気中 CO₂ 濃度で考察したのと全く同じ現象です。

それに加えて、土地利用の変化や化石燃料の消費で大気中 CO₂ 濃度が上昇したため、この変化を緩和するように海洋の吸収量が更に増加した（ルシャトリエの法則）ものと解釈できます。

産業革命前夜は、マウンダー極小期などの無黒点期で知られるように太陽活動が極端に低下して、完新世（ここ 1 万年ほど続いている間氷期）の中で最も寒冷な時期であった小氷期でした。その後、太陽活動が再び活発になり、寒冷期が終わって気温が回復して、現在は産業革命当時から 0.6～1.0℃ほど気温が上昇していると考えられています。

この気温の上昇にともなって、海洋部分からの CO₂ 放出反応が活発になったことがこの間の大気中 CO₂ 濃度上昇の主要な原因です。

大気中 CO₂ 濃度に対する化石燃料の消費の寄与

それでは、現在の人間活動に伴う化石燃料の消費が大気中 CO₂ 濃度にどの程度影響しているのかを考えることにします。基本となる関係式を再掲しておきます。

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

上式を大気中 CO₂ 量 $Q(t)$ と大気への CO₂ 流入量 $q_{in}(t)$ との関係に書き直します。

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

IPCC の図では厳密には $\sum q_{in}(t_1) \neq \sum q_{out}(t_1)$ ですが、実際には数%の違いは大した意味はありません。ここでは CO₂ 放出量の 大気中 CO₂ 濃度への寄与を考察しますので、便宜的に次の値を用います。

$$r(t_1) = \frac{\sum q_{in}(t_1)}{Q(t_1)} = \frac{218.2}{762} = 0.2864(1/yr)$$

これは、現在の 大気中 CO₂ は、1 年間に 28.64% が入れ替わることを示しています。産業革命以前では 31.9% でしたから、すこし交換率が小さくなっています。それでもわずか 1 年間で 大気中 CO₂ 量の 1/3 程度が入れ替わっているのです。

各 CO₂ 放出源 i からの放出量 q_i による 大気中 CO₂ 量に対する寄与を Q_i とすると、

$$Q_i = \frac{q_i}{0.2864} (GtC)$$

この式を用いて、現在の各放出源からの寄与を計算したものを次表に示します。

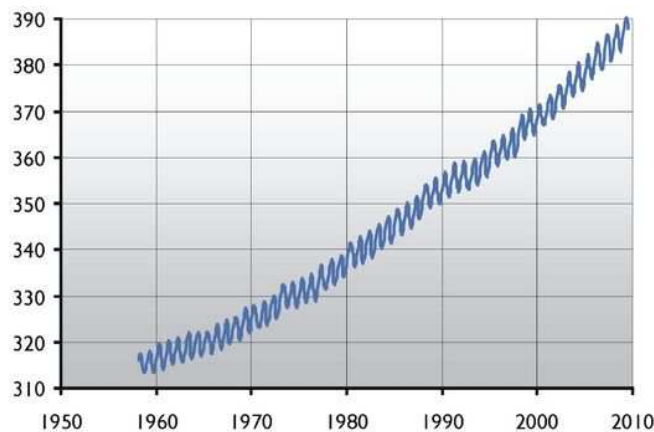
放出源	q_i (GtC/yr)	$Q_i = q_i / 0.2864$ (Gt)	体積濃度 (ppm)
呼吸	119.6	417.6	195.9
土地利用変化	1.6	5.6	2.6
海洋放出	70.6+20	316.3	148.4
化石燃料の消費	6.4	22.3	10.5
合計	218.2	762	357.4

以上から、現在の 大気中 CO₂ 濃度を 357.4ppm とすると、化石燃料の消費で放出されている人為的 CO₂ の寄与は 10.5ppm、比率にして $10.5/357.4 = 2.9\%$ だということがわかります。

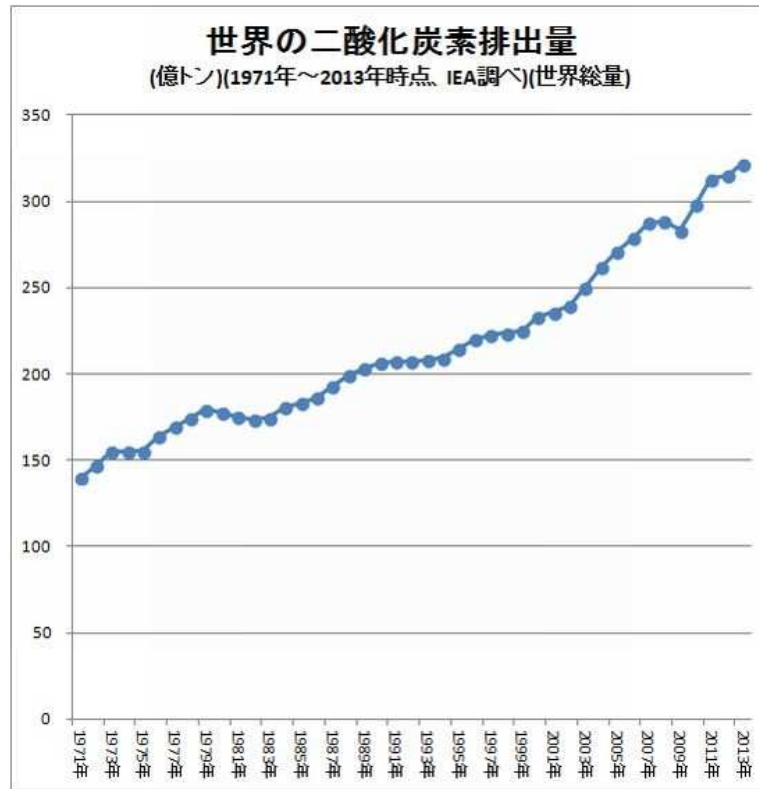
産業革命以前の 大気中 CO₂ 濃度は 280ppm なので 現在までの増加は $(357.4 - 280) = 77.4ppm$ です。人為的 CO₂ の影響は $10.5/77.4 = 13.6\%$ です。

化石燃料消費削減の効果を確認する

IPCC の炭素循環図の数値は少し古くなりましたので、最近の数値を見ておくことにします。



上図はハワイ Mauna Loa 観測所における大気中 CO₂濃度の観測値の変動曲線です。図から現在の平均的な大気中 CO₂濃度を 390ppm 程度としておきます。



上図から、現在の人為的な CO₂の年間放出量は 320 億トン=32Gt とします。炭素重量に換算すると、CO₂の分子量は 44、Cの原子量は 12 なので、
 $32(\text{Gt/yr}) \times (12/44)(\text{GtC/Gt}) \doteq 8.73(\text{GtC/yr})$

大気中の CO₂の交換率は便宜的に前回使用した $r = 0.2864(1/\text{yr})$ をそのまま使うことにします。現在の大気中 CO₂量に対する人為的に放出されている CO₂の寄与は、
 $8.73(\text{GtC/yr})/0.2864(1/\text{yr}) = 30.48(\text{GtC})$

これを大気中 CO₂濃度に換算すると
 $30.48(\text{GtC})/2.132(\text{GtC/ppm}) = 14.3\text{ppm}$

大気中 CO₂濃度 390ppm の内、人為的に放出されている CO₂の寄与率は、
 $14.3 \div 390 = 3.7\%$

です。産業革命から現在まで増加した大気中 CO₂濃度は、 $390 - 280 = 110\text{ppm}$ なので、この産業革命以降の大気中 CO₂濃度の増加量に対する人為的に放出されている CO₂による寄与率は、
 $14.3 \div 110 = 13\%$

に過ぎません。したがって、人為的に放出している CO₂ 量をゼロにしたとしても、大気中 CO₂ 濃度は 390ppm から $(390 - 14.3) = 375.7\text{ppm}$ に減少するだけです。

現在、温暖化対策として、化石燃料の消費量を削減して CO₂ 放出量を減らすという政策が世界中で取られています。しかし、仮に「二酸化炭素地球温暖化仮説」が正しいとしても、化石燃料消費をゼロにしても、減らせる大気中に含まれる CO₂ 量は 14ppm 程度に過ぎません。産業革命以降に増加した大気中 CO₂ 濃度に占める割合ですら 13%に過ぎません。温暖化対策としての化石燃料消費量の削減はど実質的な効果はありません。

§4 人為的 CO₂ 蓄積仮説を検討する

これまでの検討で、産業革命から現在までに上昇した大気中 CO₂ 濃度の 87% は気温上昇などに伴う自然現象だということがわかりました。したがって、仮に、産業革命以降の大気中 CO₂ 濃度の上昇が気温上昇の主因だとする CO₂ 温暖化仮説が正しいとしても、CO₂ 濃度の上昇の主因が自然現象なのですから、産業革命以降の気温上昇の主因は自然現象であるというのが科学的な結論です。

現在、温暖化対策として人為的な CO₂ 排出量を削減しようとして躍起になっていますが、仮に CO₂ 放出をゼロにしたところで、削減できる CO₂ 量は 14.3ppm に過ぎず、「CO₂ 温暖化対策」としてほとんど効果がないのです。CO₂ 温暖化対策につき込まれる莫大な税金は、CO₂ 温暖化対策商品を製造販売する企業を肥え太らせるだけで、温暖化を防止する実質的な効果はなく、庶民生活を悪化させるだけです。

ここでは、人為的 CO₂ 地球温暖化仮説が成立するための条件の一つである人為的 CO₂ 蓄積仮説を詳しく検討することにします。

4-1 大気中の CO₂ の基本的な挙動

大気中に放出された CO₂ は急速に混合し、区別できない

CO₂ の放出源が異なっても炭素原子に区別はありません。炭素原子の同位体は物理・化学的な性質が異なりますが、大部分 (98.93%) を占める質量数 12 の ¹²C であれば区別することは出来ません。一旦大気中に放出されてしまえば、その後の CO₂ の挙動は放出源とは無関係です。この化学的に最も基本的な性質から、人為的に放出された CO₂ の半分だけが『選択的に』大気中に『蓄積』するという主張は不合理です。

大気中 CO₂ 濃度は世界各地で観測されています。観測記録を見ると南極の south pole 基地、ハワイの Mauna Loa 観測所、日本の南鳥島の観測所・・・、季節変動を除けば、どの観測所の観測値、そして変動傾向も非常によく対応しています。これは、大気は急速に攪拌されて一様に混合が進むことを示しています。その結果、対流圏の乾燥大気の組成はどこでも共通の値を示すのです。したがって、大気中の CO₂ の空間的な分布に CO₂ 放出源による地域的な偏りもありません。

以上を総合すると、人為的 CO₂ 蓄積仮説では、産業革命以降、化石燃料消費で大気中に放出した CO₂ の炭素重量は 350GtC 程度であり、その半分が大気中に蓄積することで大気中 CO₂ 濃度が 100ppm 程度上昇したと主張していますが、それは化学的に起こり得ないことなのです。

大気中に存在する CO₂ すべて同じ吸収率で吸収される

大気中の CO₂ 濃度を決めている機構を考えてみます。

初期状態として、大気中の CO₂ 濃度が安定している平衡状態を想定します。そこに、地表面環境からの CO₂ 放出量の変動があり、大気中の CO₂ 濃度が変動したとします。この変動に対して変動を緩和して、新たな平衡状態に遷移するように地表面環境の CO₂ 吸収量が増えるのです (CO₂ 吸収量を迅速かつ最終的に調整しているのは無生物的な化学反応である海洋の CO₂ 吸収量です。)

炭素循環について、植田は年毎の離散的な表現で級数によるモデル化を行いました。ここでは微分形式による表現を基礎に連続量としてモデル化することにします。

問題を単純化するために、地表面環境からの CO₂ 放出量 q_{in} 、地表面環境の年間吸収率 r を定数だ

とします。微小時間 dt の間の大気中に含まれる CO_2 量の変化量を dQ とします。地表面環境の CO_2 吸収量 $q_{\text{out}} = rQ$ です。

$$dQ = (q_{\text{in}} - q_{\text{out}})dt = (q_{\text{in}} - rQ)dt \quad \therefore \frac{dQ}{dt} + rQ = q_{\text{in}}$$

これは簡単な微分方程式であり、一般解は次の通りです。

$$Q(t) = \frac{q_{\text{in}}}{r} + C \cdot e^{-rt} \quad \text{ここに、} C \text{は積分定数}$$

$t = 0$ における Q の初期値を Q_0 として積分定数を決定すると次の通りです。

$$Q(t) = \frac{q_{\text{in}}}{r} + \left(Q_0 - \frac{q_{\text{in}}}{r} \right) e^{-rt} \quad (1-1)$$

式(1-1)は、炭素循環に係る地表面環境からの CO_2 放出量 q_{in} 、大気中の CO_2 量 Q 、大気中の CO_2 量に対する年間吸収率 r の相互の関係を明示的に示しています。大気からの CO_2 吸収量 q_{out} は、 Q と r の積として決まります。

式(1-1)について $t \rightarrow \infty$ の極限值を求めることで Q の定常解、つまり化学平衡に達した時の大気中 CO_2 量は次式で求めることができます。

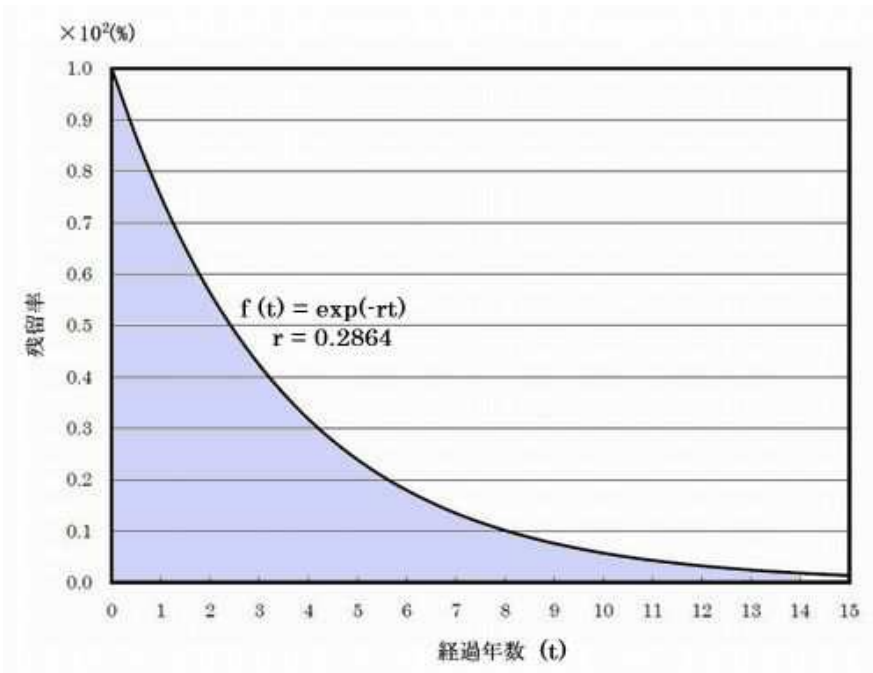
$$\lim_{t \rightarrow \infty} Q(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \left(\frac{q_{\text{in}}}{r} + \left(Q_0 - \frac{q_{\text{in}}}{r} \right) e^{-rt} \right) = \frac{q_{\text{in}}}{r} \equiv Q$$

これは、気体の水に対する溶解反応の化学平衡の条件 $q_{\text{in}} = q_{\text{out}} = rQ$ と一致します。このような化学平衡に達した系では、 Q の内、年率 r だけが地球環境に吸収されます。同時に同じ量の CO_2 が補填されています。つまり、大気中 CO_2 量 Q は変化しませんが、常にその一定割合 r が入れ替わっているのです。

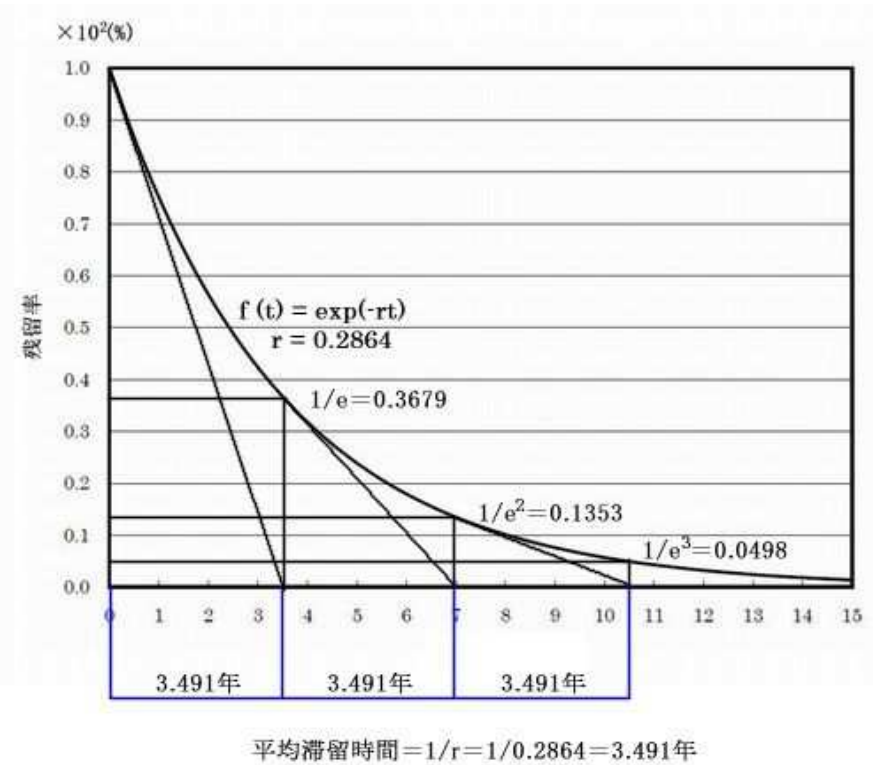
ある時点で大気中に存在する CO_2 量 Q_0 が、時間の経過によって地表面環境に吸収されてどのように減少するかを見ておくことにします。これは、式(1-1)の右辺の Q_0 を含む項の変化を調べることでわかります。時間経過による残留率は次式で表されます。

$$\text{残留率} = \frac{Q_0 e^{-rt}}{Q_0} = e^{-rt}$$

下図は、初期状態 ($t = 0$) において大気中に存在していた CO_2 について、時間の経過とともに残留率がどのように減少するかを示したものです (着色部分)。 r の値は IPCC2007 年の炭素循環を参考に、 $r = 0.2864(1/\text{yr})$ とします。



1年間に Q の内の $r = 0.2864$ だけが吸収されるので、単純に考えれば、 $1/r = 3.491$ 年ですべてが入れ替わるように思われます。3.491 年を平均滞留時間と呼びます。



仮に、地表面環境の年間吸収量が rQ で一定であれば、上図の $t = 0$ の接線に沿って CO_2 が減少します。確かにその場合は 3.491 年ですべてが入れ替わることになります。しかし、当初大気中に存在していた CO_2 は時間 Δt が経過すると ΔQ だけ減少するため、 Δt 経過後の年間吸収量は

$$q_{\text{out}}(\Delta t) = r(Q - \Delta Q)$$

に減少します。このような関係を満足するのが図に示した指数関数です。この関数の特徴は、平均滞留時間が経過するごとに、残留率が $1/e = 1/2.71828 = 0.3679$ 倍になることです。したがって、平均滞留時間の3倍が経過すると、残留率は5%未満にまで低下します。

以上から、大気中のCO₂は概ね10年程度経過すれば大部分(95%程度)が入れ替わります。したがって、人為的CO₂蓄積説の「産業革命以降に人為的に放出されたCO₂が200年間以上も大気中に蓄積し続けて現在の大気中CO₂濃度を上昇させている」という主張は不合理です。

逆に見れば、現在、大気中に存在しているCO₂量の95%程度は、最近10年間に放出されたCO₂なのです。しかも、その割合は現在に近づくほど高いのです。したがって、Qの変化が準定常である場合、Qに占める各放出源毎の割合は、直近のCO₂放出量の比率で近似することが出来るのです。

さて、 Δt 経過すると、大気には新たなCO₂が ΔQ だけ供給され、全体量はQで変化しません。増加した ΔQ に対する年間吸収量は当然 $r\Delta Q$ です。したがって、系全体に対する年間吸収量 q_{out} は、

$$q_{out} = q_{out}(\Delta t) + r\Delta Q \equiv rQ$$

です。これは、着目時点の前から残存しているCO₂と着目時点で今正に放出されたCO₂のいずれも、同一の吸収率 r で地表面環境に吸収されることを意味します。これは、大気中に存在するCO₂は放出源だけではなく、放出された時期によっても区別されないことを示しています。

4-2 循環モデルと人為的CO₂蓄積モデル

循環モデルによるシミュレーション

連続量に拡張した循環モデルを用いて、炭素循環をシミュレートしてみます。

まず、IPCC2007年の炭素循環図の産業革命前の定常状態を考えてみます。 $Q_0 = 597\text{GtC}$ 、 $q_{in} = 190.2\text{GtC/yr}$ 、 $r = q_{in}/Q_0 = 0.3186$ です。これらの数値を式(1-1)に代入すると次の通りです。

$$Q(t) = \frac{190.2}{0.3186} + \left(597 - \frac{190.2}{0.3186} \right) e^{-rt} = 597(\text{Gt}) \quad (1-2)$$

$Q(t)$ は t に関わりのない定数関数になるので、定常状態を正しく表現しています。

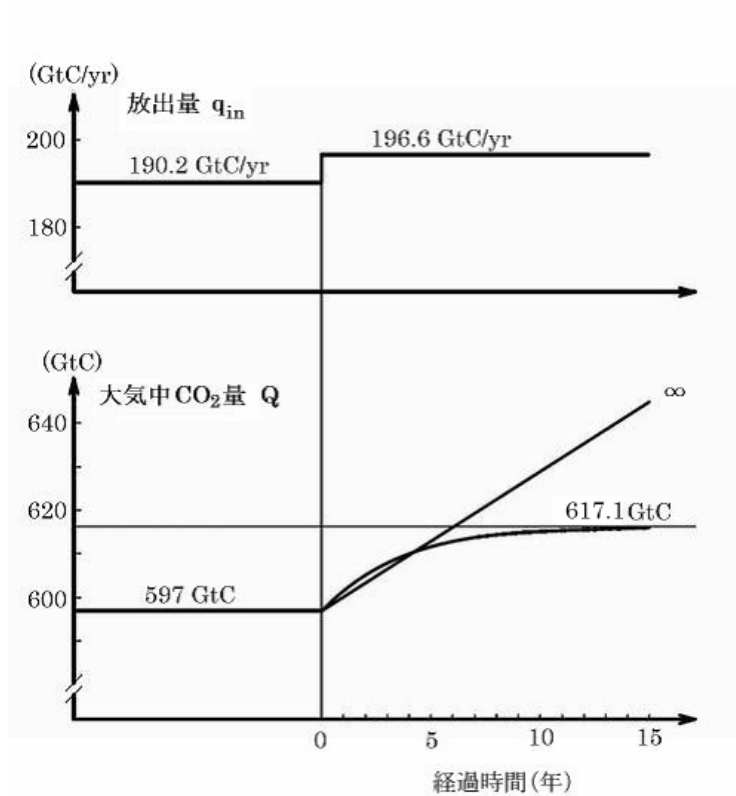
この定常状態において、ステップ関数的に人為的なCO₂放出量 $\Delta q_{in} = 6.4\text{GtC/yr}$ が増加したケースを考えます。つまり、 $q_{in} = 190.2 + 6.4 = 196.6\text{GtC/yr}$ とします。

$$Q(t) = \frac{196.6}{0.3186} + \left(597 - \frac{196.6}{0.3186} \right) e^{-rt} = 617.1 - 20.1e^{-rt} \quad (1-3)$$

下図に、地表面環境からのCO₂放出量 q_{in} と大気中のCO₂量 $Q(t)$ の人為的なCO₂放出量 6.4GtC/yr が増加する前後を表す式(1-2)、式(1-3)を15年経過の時点まで示します。

式(1-3)において $t \rightarrow \infty$ の極限值は次の通りです。

$$\lim_{t \rightarrow \infty} Q(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} (617.1 - 20.1e^{-rt}) = 617.1(\text{GtC})$$



循環モデルは、大気中の CO₂ 量が定常状態にある場合、地表面環境からの CO₂ 放出量が増加した場合の時間経過に伴う緩和過程を同一の式(1-1)で適切に表現できる一貫したモデルです。

シミュレーションでは q_{in} の変化をステップ関数的に与えたため、新たな平衡状態への遷移に少し時間がかかっていますが、それでも 10 年程度経過すれば最終状態の 90%以上にまで急速に収束しています。実際には、人為的 CO₂ が 6.4GtC/yr になるには 200 年間程度かかっていますから、遷移は準定常的に起こると考えて差し支えありません。

人為的 CO₂ 蓄積モデルによるシミュレーション

次に、人為的 CO₂ 蓄積説について考えます。人為的 CO₂ 放出量 $\Delta q_{in} = 6.4\text{GtC/yr}$ が増加する前後の人為的 CO₂ 蓄積モデルを表す式は以下のとおりです。

$$\textcircled{1} \Delta q_{in} \text{ の増加前 } Q(t) = 597(\text{GtC}) \quad (2-1)$$

$$\textcircled{2} \Delta q_{in} \text{ の増加後 } Q(t) = 597 + 0.5 \times \Delta q_{in} \times t = 597 + 3.2t (\text{GtC}) \quad (2-2)$$

これは全く循環モデルと異なる性質を持っています。 Δq_{in} 増加前の定常状態において、なぜ大気中の CO₂ 量 Q が 597GtC になるのか、 $q_{in} = 190.2\text{GtC/yr}$ との関係が全く説明されていません。蓄積モデルでは、定常状態の大気中の CO₂ 量は、 q_{in} とは独立にどのような値を取ることも可能です。

Δq_{in} 増加後の式を見ると、 $Q(t)$ は人為的 CO₂ 放出量 Δq_{in} だけの関数になっています。したがって人為的 CO₂ 蓄積モデルでは、自然起源の CO₂ 放出量がどのように変化しても、 $Q(t)$ には一切影響がないことになります。

人為的 CO₂ 蓄積モデルは、気体の水に対する溶解反応における化学平衡と矛盾する主張です。自然

起源の CO₂ の放出量ないし吸収量が増加することは大気中 CO₂ 濃度の上昇を伴います。また人為的 CO₂ 蓄積モデルは、有史以前の氷期—間氷期サイクルに伴う大気中 CO₂ 濃度の変動を説明することが出来ない欠陥モデルです。

この蓄積モデルによるシミュレーション結果も上図に併記しています。Δq_{in} 増加後の変化は 1 次関数になります。したがって、

$$\lim_{t \rightarrow \infty} Q(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} (597 + 3.2t) = \infty$$

これは、どんなに小さくても有限の人為的 CO₂ 放出があれば、大気中の CO₂ 量 Q(t) は時間の経過とともに∞に発散してしまうことを主張しています。これは、気体の水への溶解反応の化学平衡から見て不合理です。Δq_{in} という擾乱を与えれば、系はその変化を緩和する方向に化学平衡を遷移して再び安定します。人為的 CO₂ 蓄積モデルでは有限の値に収束すること無く、∞に発散する化学的に不合理なモデルです。

上図に示した q_{in} の変化を表すグラフを見たとき、わずか 3.4% の変化で Q が発散するような劇的な変化が生じるという主張は、常識的に、あるいは直感的にもとても納得できません。これを説明するためには地球環境のカタストロフィックな質的な変化が必要であろうと考えますが、残念ながらそのような説明を聞いたことがありません。

支離滅裂な人為的 CO₂ 蓄積仮説

人為的 CO₂ 蓄積仮説の成立条件を列挙します。

- ① Q(t) の変化は人為的 CO₂ 放出量 Δq_{in} の 50% が蓄積することで生じる。つまり、Δq_{in} に対する吸収率は、放出された初年度は 0.5(1/yr)、2 年目以降は 0(1/yr)。
- ② 自然起源の CO₂ 放出量に如何なる変化があっても単年度で 100% 吸収されるために Q(t) に一切影響を与えない。したがって、自然起源の CO₂ 放出量に対する吸収率は、初年度は 1.0(1/yr)、2 年目以降は 0(1/yr) です。

このように、人為的 CO₂ 蓄積仮説では、同じ大気中に存在している CO₂ であっても、CO₂ 放出源の種別、あるいは放出された時期の違いによって、それぞれ吸収率が独立に指定されています。このように人為的 CO₂ 蓄積仮説の主張は、一旦大気中に放出されてしまえば、CO₂ を化学的に区別できないという大前提に矛盾したモデルです。

人為的 CO₂ 蓄積説では人為的 CO₂ の放出がゼロになったとしても、その時点の大気中 CO₂ 量が未来永劫変化しない事になります。

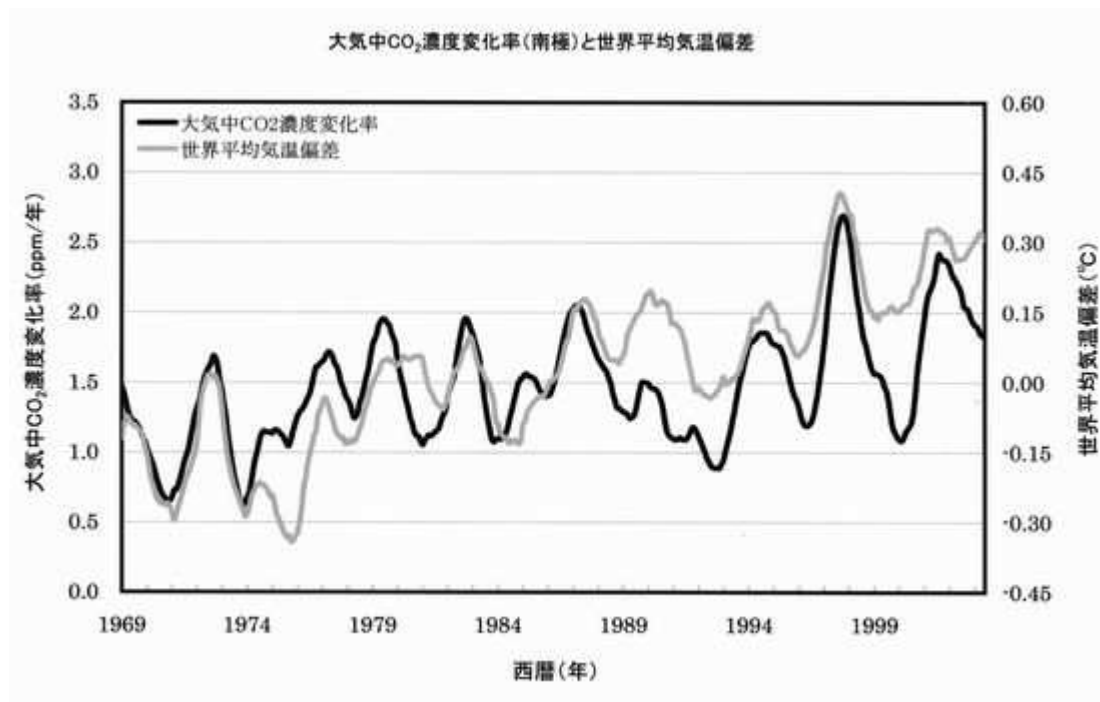
§5 大気中 CO₂ 濃度の上昇は気温上昇の結果

これまでの議論をまとめておきます。

- ①地表面環境と大気の間でCO₂は循環しており、CO₂の大気中の平均滞留時間は3.5年程度であり、10年程度で95%以上が入れ替わっている。したがって、産業革命以降に化石燃料の消費によって放出されたCO₂が大気中に200年間も『蓄積されて』現在の大气中CO₂濃度を上昇させることはない。
- ②大気中CO₂濃度に対する地表面環境からのCO₂放出源からの寄与は、時間あたりの放出量の比率による。したがって、産業革命以降に観測されている大気中CO₂濃度上昇に対して、最も大きな影響を与えているのは、時間当りのCO₂放出量の増加が最も大きな海洋である。大気中CO₂濃度上昇の主因は海洋からのCO₂放出=自然現象である。
- ③産業革命以降に観測されている気温上昇の原因が大気中CO₂濃度上昇による付加的な温室効果の上昇だとしても、大気中CO₂濃度上昇の主因は自然現象であり、したがって、産業革命以降に観測されている気温上昇の主因は自然現象である。

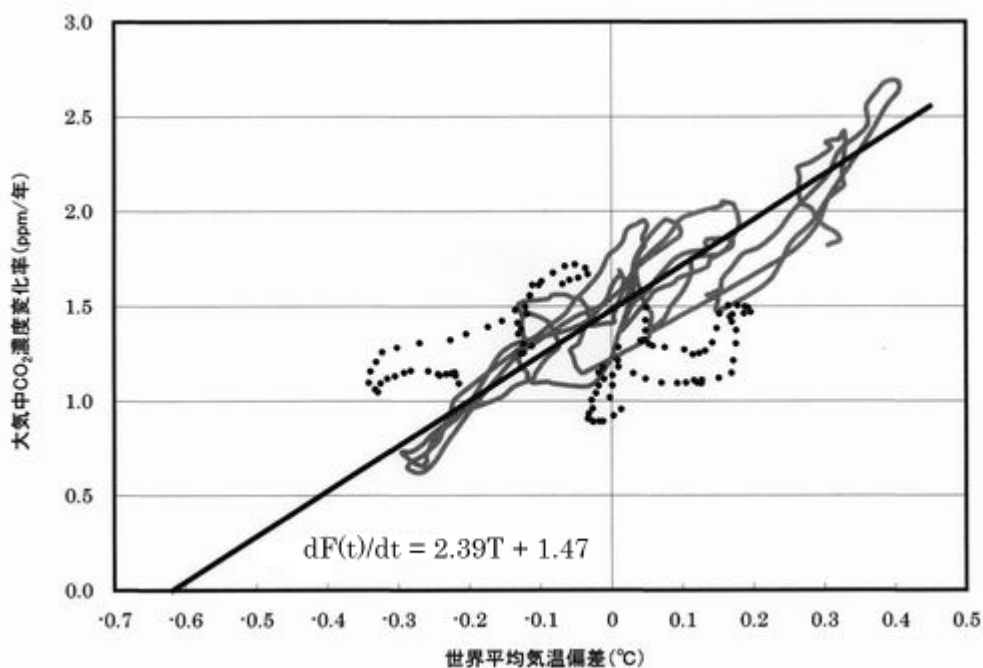
海洋からのCO₂放出量増加の原因は海洋表層水温の上昇⇨気温上昇です。ここから類推できることは、気温上昇は大気中CO₂濃度上昇の結果ではなく、むしろ原因である可能性が高いと考えられます。つまり、産業革命以降に観測されている気温上昇と大気中CO₂濃度の変動機構は氷期—間氷期サイクルと同じだと考えられるのです。

熱物理学者の槌田敦と私は、近年の大気中CO₂濃度の観測結果と気温変動について分析を行いました。その結論的な解析結果を紹介します。



上図は、大気中CO₂濃度の時間に対する変化率と世界平均気温偏差の経年変化を同じ時間軸で示し

たものです。2つの曲線はよく同期しています。この結果について、世界平均気温偏差と大気中 CO₂ 濃度の時間に対する変化率の関係を散布図にまとめたのが次の図です。



大気中 CO₂ 濃度を $F(t)$ とすると、大気中 CO₂ 量 $Q(t)$ を使って表すと、 $F(t) = CQ(t)$ です (C は比例定数)。回帰直線の式は次のように書き換えることができます。

$$\frac{dF(t)}{dt} = 2.39T + 1.47 \equiv C \frac{dQ(t)}{dt} \quad C \text{ は定数}$$

つまり、大気中 CO₂ 量 $Q(t)$ の時間に対する変化率は、世界平均気温偏差 T の 1 次関数になるのです。循環モデルを表す微分方程式の表現を用いると、

$$\frac{dQ(t)}{dt} = q_{in} - q_{out} = C_1 T + C_2 \quad C_1, C_2 \text{ は定数}$$

つまり、地表面環境からの時間当りの CO₂ 放出量 q_{in} 、ないし地表面環境の時間当りの CO₂ 吸収量 q_{out} が気温 T の 1 次関数で近似できることがわかります。

大気中 CO₂ 量 $Q(t)$ あるいは大気中 CO₂ 濃度 $F(t)$ は、 $dQ(t)/dt$ あるいは $dF(t)/dt$ を時間 t に対して積分することで得られるので、位相が遅れます。したがって、気温の変動よりも大気中 CO₂ 濃度の変動は遅れて起こるのです。つまり、気温変動の結果として大気中 CO₂ 濃度が変化しているのです。

以上から、産業革命以降に観測されている気温上昇は大気中の CO₂ 濃度上昇の結果ではなく、因果関係は逆である可能性が極めて高いのです。つまり、産業革命以降の気温と大気中 CO₂ 濃度の関係は、氷期-間氷期サイクルの場合と本質的に同じだと考えられます。現在においても、気温上昇を原因として、結果として大気中 CO₂ 濃度が上昇するのです。