

# 解題 CO<sub>2</sub> 循環を理解するための数学的枠組み

HP 管理者 近藤邦明

## 0. はじめに

近年観測されている大気中 CO<sub>2</sub> 濃度の上昇の主要な原因が人為的なものなのか、あるいは自然現象であるのかの不毛な「論争」がいまだに続いている。

大気中 CO<sub>2</sub> 濃度の上昇の主因が人為的なものであるとする「人為的 CO<sub>2</sub> 地球温暖化論者」によって現在世界的に進められようとしている人為的な CO<sub>2</sub> 排出量の削減によって地球の温暖化をコントロールするという、人類史上初めて自然環境を制御するという夢のようなプロジェクトの自然科学的な根幹を成す主張である「人為的 CO<sub>2</sub> 蓄積説」の誤りを、彼らは今更認めることは出来ないのである。

その結果、子供の思いつき程度の稚拙な人為的 CO<sub>2</sub> 蓄積説に固執し、それを崇高な科学理論に祭り上げるために、学術的な権威組織を動員して不可解な説明が繰り返されている（例えば、東大 IR3S『地球温暖化懐疑論批判』議論 14、議論 16、議論 18 など。）。

本稿では、植田によって提唱された離散的な表現の大気中 CO<sub>2</sub> の循環モデル（級数モデル）を連続量へ拡張した小島順氏の循環モデルを説明し、その現象論的解釈から、近年観測されている大気中 CO<sub>2</sub> 濃度上昇の主要な原因が人間活動ではないこと、したがって、人為的な CO<sub>2</sub> 排出量の削減では大気中 CO<sub>2</sub> 濃度を削減することが出来ないことを示し、この不毛な論争に終止符を打つことにしたい。

## 1. 大気を巡る炭素循環の概要

大気を巡る炭素循環について、IPCC の 2007 年の報告からの数値を気象庁がまとめた図を次頁に紹介する（数値は炭素重量）。

図を元に、IPCC の主張する炭素循環の概要を整理しておくとの通りである。

陸域の CO<sub>2</sub> 放出量 = 1,196 + 16 = 1,212 億トン/年 = 121.2Gt/年 =  $q_{in1}$

陸域の CO<sub>2</sub> 吸収量 = 1,200 + 26 + 2 = 1,228 億トン/年 = 122.8Gt/年 =  $q_{out1}$

海域の CO<sub>2</sub> 放出量 = 706 + 200 = 906 億トン/年 = 90.6Gt/年 =  $q_{in2}$

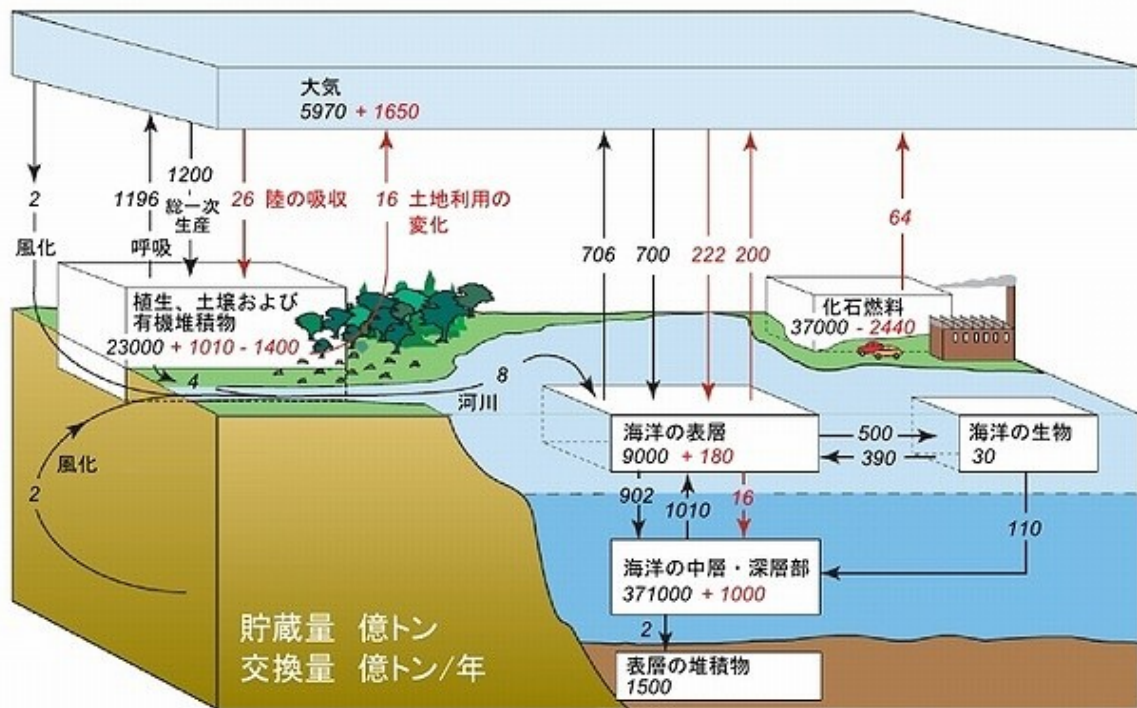
海域の CO<sub>2</sub> 吸収量 = 700 + 222 = 922 億トン/年 = 92.2Gt/年 =  $q_{out2}$

化石燃料燃焼による CO<sub>2</sub> 放出量 = 64 億トン/年 = 6.4Gt/年 =  $q_{in3}$

ここに、 $q_{in}$  は大気への流入量を示し、 $q_{out}$  は大気からの流出量を示す。  
 以上をまとめると、大気中に残留する  $CO_2$  量  $Q$  の変化  $\Delta Q$  は次の通りである。

$$\Delta Q = \Sigma q_{in} - \Sigma q_{out} = 218.2 - 215 = 3.2 \text{ (Gt/年)}$$

つまり、大気中  $CO_2$  量は炭素重量で年率 3.2Gt 増加している。



炭素循環の模式図(1990年代)

IPCC(2007) をもとに作成。各数値は炭素重量に換算したもので、貯蔵量(箱の中の数値、億トン)あるいは交換量(矢印に添えられた数値、億トン/年)をあらわしている。黒は自然の循環で収支がゼロであり、赤は人間活動により大気中へ放出された炭素の循環をあらわしている。

## 2. 植田—小島による循環モデル

前節で紹介したとおり、IPCC は陸海と大気を巡る大規模な炭素 ( $CO_2$ ) の循環構造があることを主張している。

対流圏大気に  $CO_2$  が連続的に供給され、しかも大気中に存在する  $CO_2$  量が殆ど定常状態を保っているということは、大気に供給される  $CO_2$  量にほぼ均衡する  $CO_2$  量が陸海に吸収されていることを示している。つまり、大気中に放出された  $CO_2$  はある期間大気中に滞留した後に再び陸海に吸収され、大気中に永続的に『蓄積』され続けることはないのである。

この炭素循環に対して、1年毎の  $CO_2$  放出量に対して離散的に表現したのが植田の級数

モデルである。結論だけ示すと以下の通りである。

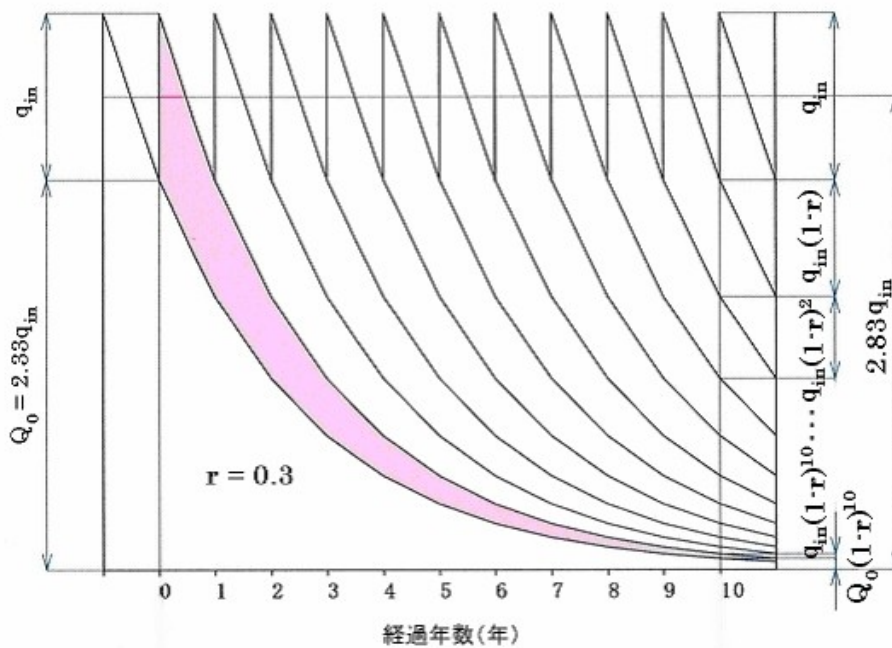
$$Q = q_{in} \times \{1 - (1-r)^{(n+1)}\} / r$$

ここに、 $r$  は1年間あたりの陸海の吸収率 ( $< 1.0$ ) を示す。 $n \rightarrow \infty$  の極限をとることによって、定常状態に達した循環モデルは次のように表すことができる。

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

あるいは、陸海の吸収率の代わりに大気中残留率  $a$  ( $a = 1 - r$ ) を用いれば、次式の通りである。

$$Q = q_{in} / (1 - a)$$



さて、槌田の離散的モデルでは、陸海からの1年当たりのCO<sub>2</sub>放出量  $q_{in}$  が一度に放出されるものとして表現した。小島は、 $q_{in}$  を連続量として取り扱うように変更した。単位時間当たりのCO<sub>2</sub>放出量の時間依存性を考慮して一般的に  $q(t)$  とすると次式が成り立つ。

$$\int_0^{1\text{年}} q(t) dt = q_{in}$$

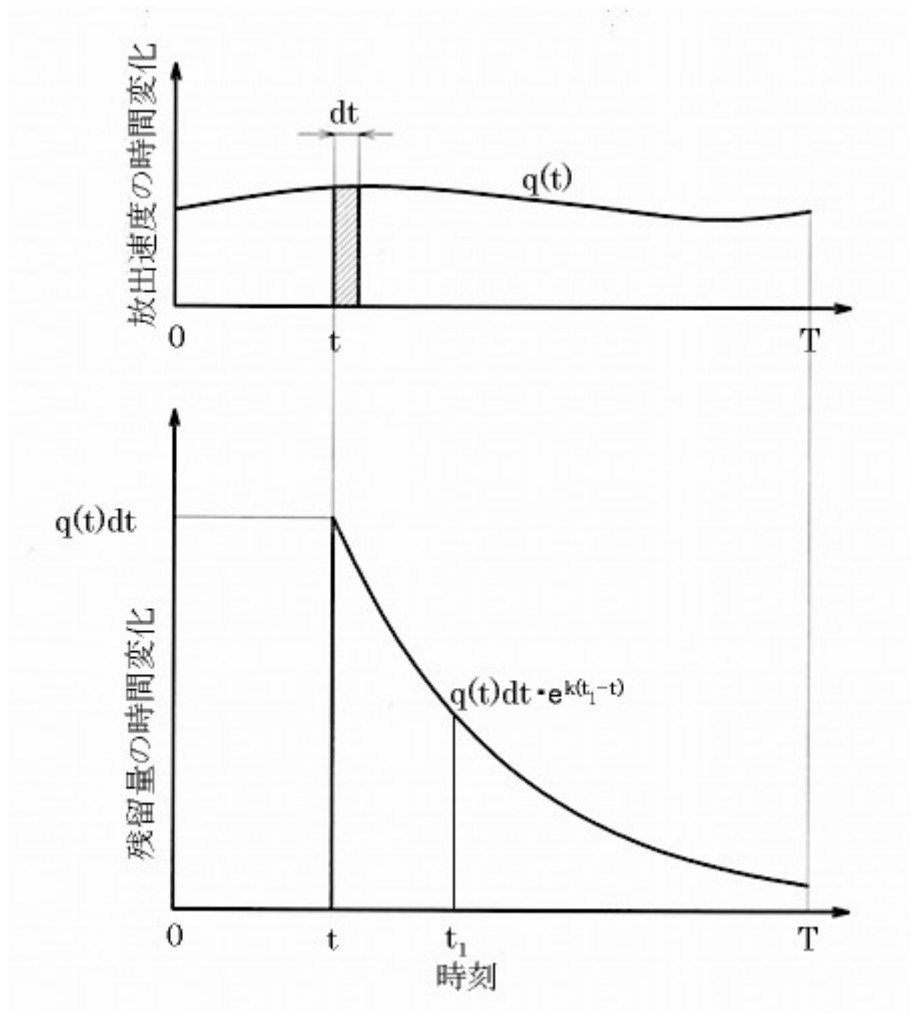
時刻  $t$  における瞬間のCO<sub>2</sub>放出量は、微小な時間幅を  $dt$  と置くと次式で表すことができる。

$$q(t)dt$$

時刻  $t$  に放出された  $q(t)dt$  の年残留率を  $a$  ( $< 1.0$ ) とする。ここで、適当な指数  $k$  を用

いて、次のように表しておく。

$$a=e^k \quad k<0, \quad e=2.7182818284$$



時刻 t に放出された CO<sub>2</sub> の大気中残留量は、次式に示す曲線に沿って減少する。

$$q(t)dt \cdot e^{k(t_1-t)}, \quad t \leq t_1 \leq T$$

時刻 t に放出された CO<sub>2</sub> の内、時刻 T に大気中に残留している CO<sub>2</sub> 量は次式で表される。

$$q(t)dt \cdot e^{k(T-t)}, \quad \because t_1=T$$

時刻 t=0 から時刻 t=T までに放出された CO<sub>2</sub> の、時刻 t=T における大気中の総残留量 Q は、上式を時刻 t=0~T の範囲で積分することによって次のように求めることが出来る。ただし、ここでは q(t) と k については変化しないものとして取り扱うことにする。

$$Q = \int_0^T q \cdot e^{k(T-t)} dt = -\frac{q}{k}(1 - e^{kT})$$

定常状態は上式において  $T \rightarrow \infty$  の極限を求めることによって、次式のように求めることが出来る。

$$Q = -\frac{q}{k}$$

さて、前に紹介した IPCC の炭素循環図の数値を定常状態だと仮定して上式に用いると、 $k$  の値は次のように求めることが出来る。

$$k = -218.2 / 762 = -0.2863$$

これを年残留率に変換すると次式の通りである。

$$a = e^{-0.2863} = 0.7510 \quad (\because r = 0.2490)$$

また、 $\text{CO}_2$  の大気中での平均滞留時間  $\tau$  <sup>註1)</sup> は、

$$\tau = 762 / 215 = 3.544 \text{ 年}$$

つまり、4 年足らずで大気中  $\text{CO}_2$  の主要部分 <sup>註2)</sup> はほとんど入れ替わる。

註 1) 定常状態であれば、 $q_{\text{in}} = q_{\text{out}}$  だから  $\tau = -1/k$  の関係にある。ここでは便宜上、 $Q/q_{\text{out}} = \tau$  とした。

註 2) 平均滞留時間  $\tau$  だけ経過した時の残留量は、 $e^{-1} = 0.368$  であり、約 63% が入れ替わる。2  $\tau$  経過した時の残留量は、 $e^{-2} = 0.135$  であり、約 86% が入れ替わる。

### 3. 大気中 $\text{CO}_2$ 濃度上昇の主因は人為的な影響か？

前節において、陸海と大気を巡る  $\text{CO}_2$  循環を表すモデルを紹介した。このモデルに従って、産業革命以降の大気中  $\text{CO}_2$  濃度の変化の過程を現象的に解釈する。

通説 (= 人為的  $\text{CO}_2$  地球温暖化仮説) では、産業革命以前においては大気中  $\text{CO}_2$  濃度は安定していたとしている。通説によるとその当時の大気中  $\text{CO}_2$  濃度は 280ppm 程度、1 ppm = 2Gt (炭素重量換算) と仮定すれば、 $\text{CO}_2$  の大気中残留量は  $Q = 560\text{Gt}$  程度であったと考えられる。年交換量は  $q_{\text{in}} = q_{\text{out}} = 190.2\text{Gt/年}$  程度であったと仮定する (IPCC の炭素循環図参照)。この定常状態における数値から、指数  $k$  を求めると以下の通りである。

$$k = -190.2 / 560 = -0.3396 \quad (a = e^{-0.3396} = 0.7121)$$

さて、この定常系に人為的な CO<sub>2</sub> 放出  $\Delta q_{in}=6.4\text{Gt/年}$  という微小な摂動が加わった場合を考える。これによって、大気中への年間 CO<sub>2</sub> 放出量は  $q_{in}=196.6\text{Gt/年}$  になるが、この程度の微小な放出量の変動によって、陸海と大気を巡る循環構造に本質的な変化が生じるとは考えにくい。

故に、人為的 CO<sub>2</sub> 放出量増加の影響は、単に年間 CO<sub>2</sub> 放出量の増加として扱えば十分である。この人為的 CO<sub>2</sub> 放出量の増大によって、定常状態に達したときの大気中 CO<sub>2</sub> 量は次のように求めることができる。

$$Q = -196.6 / (-0.3396) = 578.9\text{Gt} = 289.5\text{ppm}$$

つまり、人為的な CO<sub>2</sub> 放出量の 6.4Gt/年の増加による大気中 CO<sub>2</sub> 濃度の増加は、わずかに 9.5ppm 程度にすぎない。

ところが、実際には産業革命以前から現在に至る過程で、陸海からの CO<sub>2</sub> 放出量にはそれほど大きな変化が無いにもかかわらず、大気中の CO<sub>2</sub> 濃度は 100ppm も上昇し 380ppm 程度に達している。この違いは何に起因するのであろうか？

既に示したとおり、最も大きな原因は、指数  $k$ 、つまり大気に放出された CO<sub>2</sub> の残留率の変化である。年間残留率は、産業革命以前の  $a=0.7121$  から現在は  $a=0.7510$  に増大している。

これは、陸海の大気中 CO<sub>2</sub> に対する吸収率が低下していることを示している。その原因として最も考えられるのが産業革命以降における低温の小氷期後期からの気温の回復過程の影響である。海洋表層水温が上昇すると CO<sub>2</sub> 溶解度が減少するため大気中の CO<sub>2</sub> に対する吸収能力が低下する。

同時に、海洋表層水温の上昇は海洋表層からの CO<sub>2</sub> 放出量を増大させる。IPCC の炭素循環図における海域からの人間活動による CO<sub>2</sub> 放出量の増加量 20Gt/年として示されている値は、その原因の解釈はともかく、海洋表層水温の上昇による影響を示している。

以上から、近年観測されている大気中 CO<sub>2</sub> 濃度増加の主要な原因は人為的な 6.4Gt/年程度の CO<sub>2</sub> 放出量の増加とは直接関わりの無い自然の環境条件の変化に起因する現象であると解釈する以外にない。

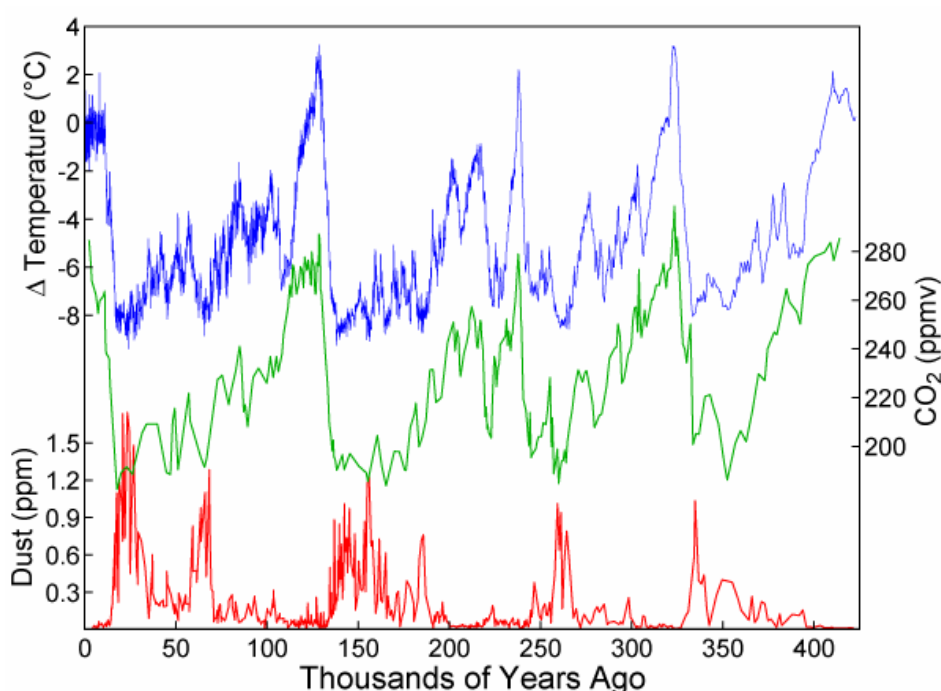
#### 4. 人為的 CO<sub>2</sub> は蓄積されるか？

日本の人為的 CO<sub>2</sub> 地球温暖化論者（例えば、東大 IR3S 『地球温暖化懐疑論批判』 議論 16、議論 18 など）は、陸海から放出された自然起源の CO<sub>2</sub> は完全に循環し、産業革命以降に人為的に大気に放出された CO<sub>2</sub> の半量程度が大気中に蓄積し続けることによって大気中の CO<sub>2</sub> 濃度を増加させていると主張する。前掲書の議論 18 によれば、人為的な CO<sub>2</sub> 放

出があれば、その一部は永久に大気中に蓄積され続けて収束することはなく発散すると主張する。この蓄積モデルはご都合主義の出来の悪い CO<sub>2</sub> 濃度モデルである。

彼らのモデルでは、自然起源の CO<sub>2</sub> に関しては完全に循環するために大気中の CO<sub>2</sub> 濃度を増加させる要因にはならないとしているが、これはおよそ非科学的である。自然現象であったとしても環境条件の変化、例えば地表付近の温度状態の変化があれば陸海の生物活動の活性度の変化、海洋表層水の CO<sub>2</sub> 溶解度の変化、有機物の分解・固定速度の変化などを通して大気中の CO<sub>2</sub> 濃度を非定常に変化させることは当然である。

歴史的に見れば、南極氷床のアイスコアの成分分析から得られた過去の大気中 CO<sub>2</sub> 濃度の推定値を見れば明らかなように、人為的な CO<sub>2</sub> 放出の存在しなかった時期においても気温変動と同期して大気中 CO<sub>2</sub> 濃度が変動している。



自然変動による CO<sub>2</sub> 循環が不変であることを前提に、すべての大気中 CO<sub>2</sub> 濃度変動の原因を人為的な CO<sub>2</sub> 放出の蓄積によるという予断によって成り立つ『蓄積モデル』は既にこの段階で不合理である。

次に、『蓄積モデル』が成立するためには、大気中に放出された自然起源の CO<sub>2</sub> と人為起源の CO<sub>2</sub> が混合しないことが必要である。さもなければ、一旦大気中へ拡散・混合した CO<sub>2</sub> の中から、自然起源の CO<sub>2</sub> と人為起源の CO<sub>2</sub> が選別され、別々の過程——自然起源の CO<sub>2</sub> は循環過程、人為起源の CO<sub>2</sub> は蓄積過程へ振り分けられなくてはならないが、これはエントロピーの減少過程であり、自然現象として起こり得ない。また現実には、大気中に一旦放出された CO<sub>2</sub> はエントロピー増大の法則からその起源の如何を問わず必然的に大気中で拡散・混合することになる。以上から自然界の中で起こりうる現象である限り、人為

的に放出された CO<sub>2</sub> と自然起源の CO<sub>2</sub> は区別されることなく同一の過程を辿ること以外はあり得ない。

これ以上の検討は最早必要ないが、『蓄積モデル』が成立するためには更に不可解な条件が必要である。蓄積モデルでは人為起源の CO<sub>2</sub> の『半分程度』が永続的に大気中に蓄積し続けると主張する。では人為起源の CO<sub>2</sub> の残りの半量程度は一体どこに消えたのであろうか？

CO<sub>2</sub> がどこかに消滅しない限り、残りの半量程度は自然起源の CO<sub>2</sub> と同様に陸海に吸収されると考える以外に合理的な解釈はない。この場合、蓄積仮説の主張する人為起源の CO<sub>2</sub> に対する吸収率は 0.5 程度ということになる。これは、自然起源の CO<sub>2</sub> の吸収率 0.2~0.3 に比べてはるかに大きい。自然起源の CO<sub>2</sub> と人為起源の CO<sub>2</sub> に対する陸海の吸収率が異なるのは不合理である。また、人為起源の CO<sub>2</sub> に対する陸海の吸収は放出の初年度だけで、そこで大気中に残留した CO<sub>2</sub> は永続的に大気中に蓄積するとは誠に不可解な主張である（東大 IR3S 『地球温暖化懐疑論批判』議論 18）。この彼らの主張が成立するためには、自然起源の CO<sub>2</sub> と人為起源の CO<sub>2</sub> が選別されるだけでなく、人為起源の CO<sub>2</sub> については更に放出年によって選別されなくてはならない。

このようにエントロピー増大の法則に反する『蓄積モデル』は物理的にあり得ないモデルなのである。

陸海と大気を巡る CO<sub>2</sub> 循環は、対流圏大気という容器に陸海から CO<sub>2</sub> が供給され、同時に陸海に CO<sub>2</sub> が吸収されている状態と考えることが出来る。対流圏ではその名の通り、大気は鉛直方向・水平方向に激しく攪拌されている。

これに近い状態の化学反応槽モデルに『完全混合流れの定常状態流装置』がある。

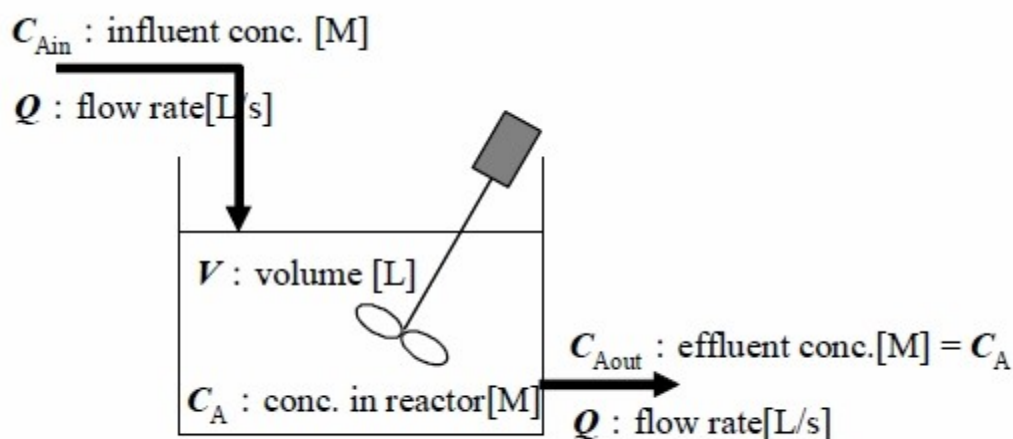
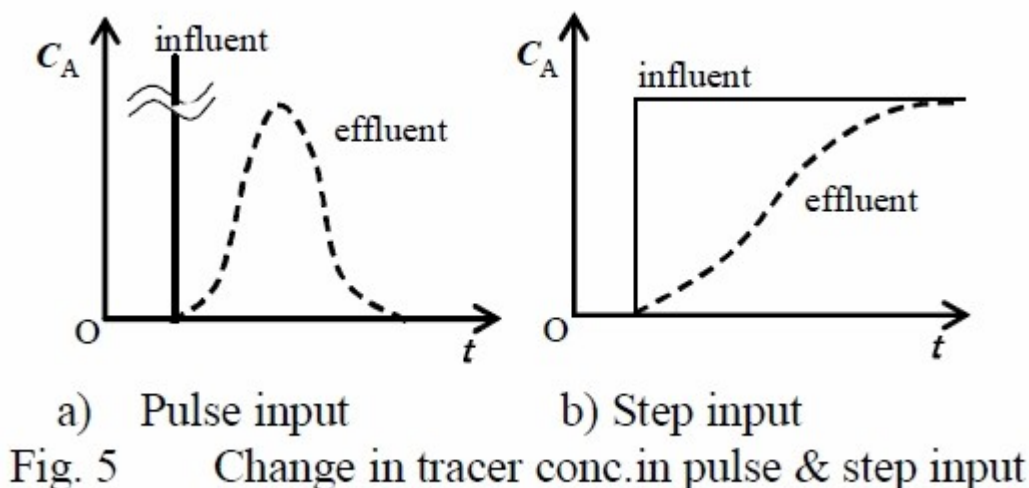


Fig.3 Notation for mixed flow reactor



この装置では、反応槽に投入された物質は、投入と同時に反応槽全体に均一に拡散すると考える。



この反応槽に、瞬間的な入力（Pulse input）を与えた場合の反応槽内の濃度変化を積分することによって、ステップ入力（Step input）を与えた場合の濃度変化を求める。

完全混合流れの場合について、瞬間的な入力による反応槽内の濃度変化の応答は次式で表される。

$$C(t) = \frac{1}{\tau} e^{-t/\tau}$$

これを積分してステップ入力に対する応答を求めると次式の通りである。

$$F(t) = C_0(1 - e^{-t/\tau})$$

これは、 $\tau = -1/k$  を考慮すると、小島による循環モデルと同じであることが分かる。

つまり、槌田—小島の示した  $\text{CO}_2$  の循環モデルとは、陸海から大気に放出された  $\text{CO}_2$  が対流圏に瞬時に一様に拡散した場合の理想的な炭素循環モデルを示しているのである。実際には、Fig.5 に破線で示すように、入力された媒質が対流圏大気に一様に拡散するには有限の時間を要するため、多少の時間遅れが生じることになる。

しかし、媒質が大気中に一様拡散するのにかかる時間に対して、入力の継続時間が十分長ければ、あるいは変動が緩やかであれば槌田—小島の循環モデルの結論は十分に実用的なものである。

実際には、対流圏大気の混合はかなり急速に進むと考えられている。一方、大気中の  $\text{CO}_2$  濃度の変化は、年率 0.3~0.4%程度で緩やかである。以上から、槌田—小島の  $\text{CO}_2$  循環モデルは大気中の  $\text{CO}_2$  濃度を解釈するモデルとして妥当なものである。

陸海と大気を巡る CO<sub>2</sub> 循環で特徴的なのは、大気に対して CO<sub>2</sub> を供給するのと、大気から CO<sub>2</sub> を吸収するのがいずれも地表面（海面）だという点である。その結果、地表面近傍では CO<sub>2</sub> 濃度勾配がかなり大きいと考えられる。

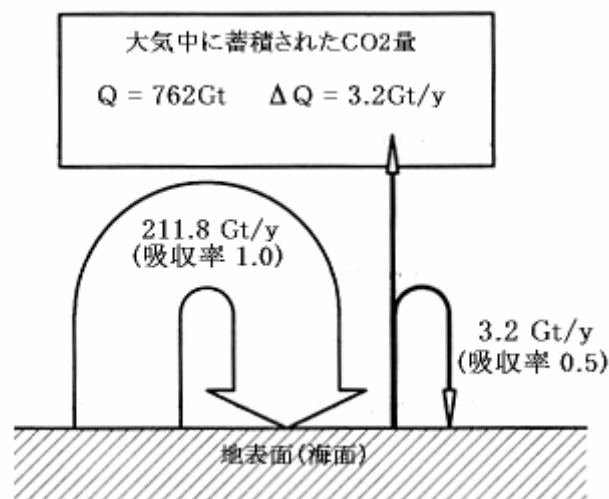
その結果、陸海から大気に放出された直後の CO<sub>2</sub> は、その他の大部分の対流圏大気に拡散した CO<sub>2</sub> に比較して相対的に高い確率で再び陸海に吸収されると考えられる。しかし、この特性は CO<sub>2</sub> の放出源毎の違いではなく、放出後の経過時間に対する特性であり、対流圏大気中における、CO<sub>2</sub> 放出源毎の混合比率は、放出源毎の放出量比率で推定できるとするのが妥当である。

以上から、対流圏に放出された CO<sub>2</sub> は放出源の如何を問わず速やかに混合が進むため、人為的 CO<sub>2</sub> だけが大気中に永続的に蓄積されることはあり得ない。また、大気中の CO<sub>2</sub> の放出源毎の混合比率は、放出源毎の放出量の比率で近似的に推定できる。

つまり、IPCC の数値を使えば、現在の大气中に存在する CO<sub>2</sub> 量 762Gt の内、人為起源の CO<sub>2</sub> 量は高々  $762 \times 6.4 \div 218.2 = 22.4\text{Gt} = 11.2\text{ppm}$  程度に過ぎない。現状で人為的 CO<sub>2</sub> 放出を完全に停止した場合でも、大気中 CO<sub>2</sub> 量の減少は微々たるものである。

## 5. 結論

日本の代表的な人為的 CO<sub>2</sub> 地球温暖化論者は、東大 IR3S 『地球温暖化懐疑論批判』議論 18 において、非常に分かりにくい弁明を試みている（注意が必要なのは、彼らがここで言う吸収量の割合は、単年度放出量に対する単年度吸収量の割合であって、私たちがこれまで使ってきた大気に含まれる総 CO<sub>2</sub> 量に対する割合とは全く別の定義であるが、彼らにはその違いさえも理解できないようである。）。要約すると、以下のような主張のように思われる（図中の数値は IPCC の炭素循環に基づく。）。



“自然起源の CO<sub>2</sub> は完全に陸海に吸収される。つまり、自然起源の CO<sub>2</sub> に対する陸海の吸収率は 1.0 である。自然起源の CO<sub>2</sub> は完全に吸収される結果、2 年度以降

に残留することはないので、2年目以降の吸収率は定義する必要がない。

人為起源のCO<sub>2</sub>に対しては、陸海はその50%を初年度に吸収する。つまり人為起源のCO<sub>2</sub>に対する陸海の吸収率は0.5であり、2年度以降はまったく吸収しないので、これも2年目以降の吸収率は定義する必要がない。”

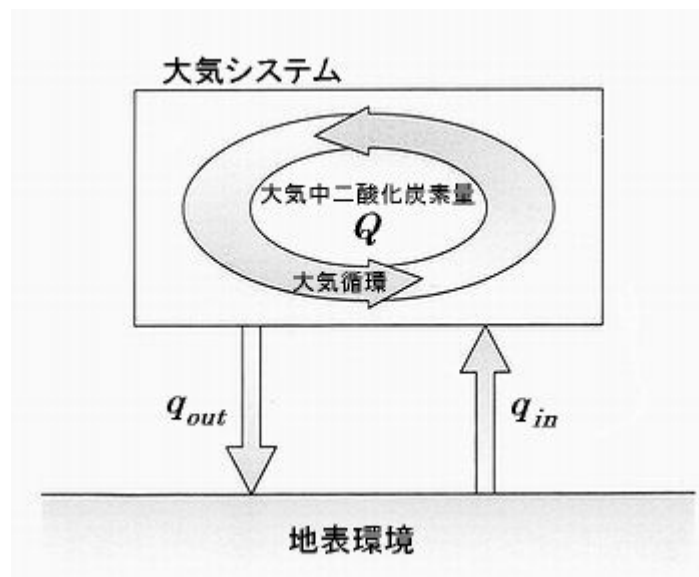
おそらくこの理解で誤りはないと考える。その結果、「生物起源のバイオエタノール燃料を使っても、すべて地表環境に吸収されてしまうので大気中のCO<sub>2</sub>濃度は変化しない」などという怪しげな主張が平気でなされるのである。

しかし、少し考えれば、これは極めて不可解なモデルである。自然起源のCO<sub>2</sub>は完全に陸海に吸収されるのであれば、産業革命以前に大気に残留していた280ppm程度のCO<sub>2</sub>はどのようにして蓄積されたのであろうか？なぜ着目年以前に大気中に残留しているCO<sub>2</sub>は一切陸海に吸収されないのであろうか？大気中ではCO<sub>2</sub>は混合しないのであろうか？・・・

このような支離滅裂なご都合主義のモデルについてこれ以上議論することは無意味である。

(2010.08.04)

#### 付録：陸海と大気のCO<sub>2</sub>循環構造を表す微分方程式



陸海（地表環境）からは、地表環境で行われている物理化学的現象や生命現象によって絶えず大気にCO<sub>2</sub>を放出（=q<sub>in</sub>）している。

同時に、地表環境は光合成や降水などによって絶えず大気中からCO<sub>2</sub>を吸収（=q<sub>out</sub>）している。その吸収速度は大気中のCO<sub>2</sub>濃度に比例すると考えられる（ここでは、大気中

の CO<sub>2</sub> 濃度はどこでも同じものとする。)。大気中の CO<sub>2</sub> 濃度は高々 400ppm 程度なので、吸収速度は近似的に大気中に含まれる CO<sub>2</sub> 量 (=Q) に比例すると考えることが出来る。その比例定数を r (0<r<1.0) とすると次の関係が成り立つ。

$$q_{out} = r \cdot Q \quad (1)$$

大気中に含まれる CO<sub>2</sub> 量 Q の時間変化率は次式で表すことが出来る。

$$\frac{dQ}{dt} = q_{in} - q_{out} = q_{in} - r \cdot Q \quad (2)$$

(2)は線形微分方程式なので、簡単に解くことが出来る。q<sub>in</sub> と r は時間に対して変化しないものとして一般解を求めると次式の通りである。

$$Q = \frac{q_{in}}{r} + C \cdot e^{-rt} \quad (3)$$

時刻 t = 0 における Q の初期値を 0 であるとして、定数 C を求めると次の通りである。

$$0 = \frac{q_{in}}{r} + C \quad \therefore C = -\frac{q_{in}}{r} \quad (4)$$

以上より、

$$Q = \frac{q_{in}}{r} (1 - e^{-rt}) \quad (5)$$

(5)において、r = -k とおけば小島による循環モデルと同じ結果を得ることが出来る。

## 参考資料

- 1) 槌田敦「CO<sub>2</sub>を削減すれば温暖化は防げるのか」日本物理学会誌 Vol.62, No.2, 2007
- 2) 小島順「CO<sub>2</sub>循環を理解するための数学的枠組み」『数学教室』2007年8月号
- 3) 大瀧雅寛「反応装置の反応効率と滞留時間分布」『生活工学研究』2004年6巻2号