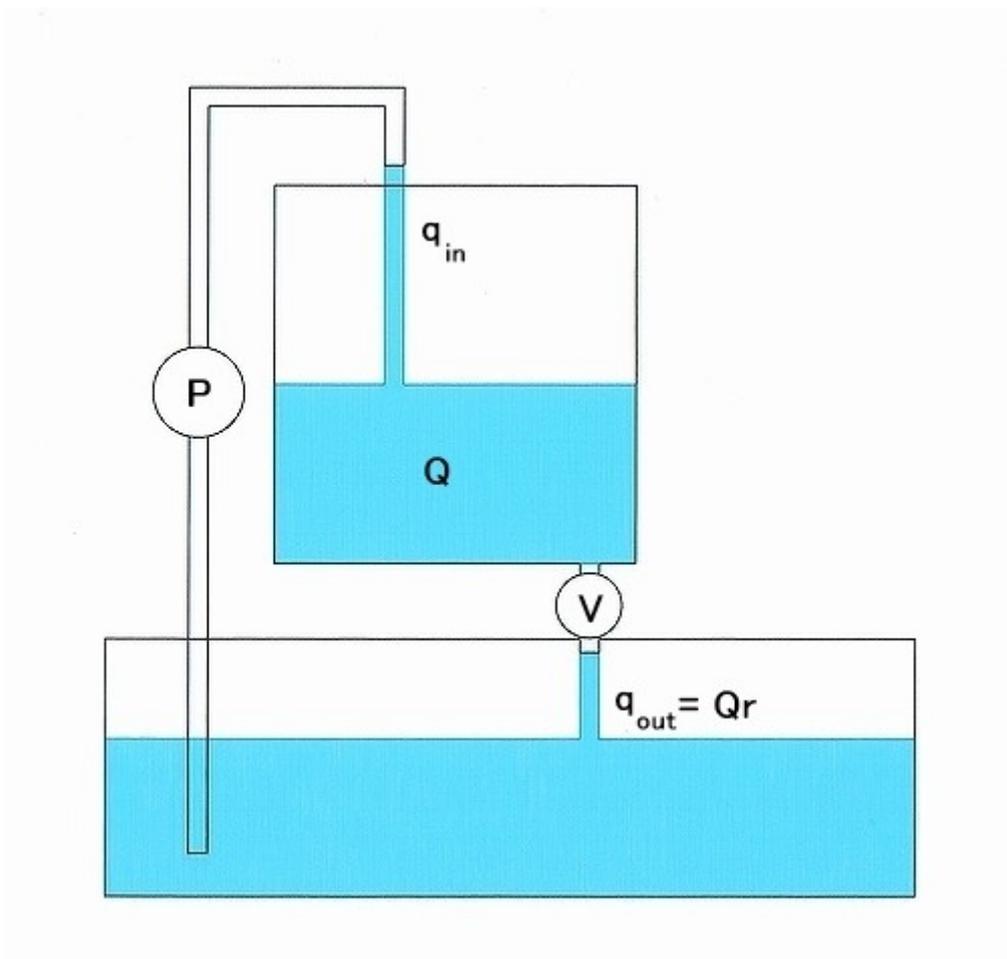


はじめに

槌田による大気中の CO₂ 濃度の概念モデルを、小学生や中学生程度を対象に視覚的に説明するための実験モデルを示すことにする。

1. 定常状態を表す循環モデル

用意するものは、タライとそれよりも小さい透明の水槽とポンプである。タライは地表環境、透明水槽は大気、そして水が CO₂ を表す。透明水槽の底面に穴を開けて次の図のように組み立てる。透明水槽の下には流量を調整するためのバルブを取り付ける。



トリチェリーの定理から、

$$q_{out} = \sqrt{2gh} \times \sigma, \quad r = \frac{q_{out}}{Q} = \frac{\sqrt{2g} \times \sigma}{S\sqrt{h}}$$

ここに、 h は水深、 g は重力加速度、 S は水槽の底面積、 σ は水槽の下から流れ落ちる水

流の断面積である。 r は単位時間に水槽に溜まっている水量の内どの程度の割合がタライに還流するかを示す値であり、交換率と呼ぶことにする。

まず、初期状態として水槽が空の状態からポンプを作動させると、 $q_{in} > q_{out}$ の間は徐々に水槽内の水位 h が上昇する。水深 h が大きくなるにつれて q_{out} が次第に大きくなり、やがて $q_{in} = q_{out}$ となって水深は一定になり、定常状態になる。

水深が安定して定常状態になった状態が産業革命以前の大気中 CO_2 濃度が安定していた状態を表しているとする。ここでは当時の大気中 CO_2 濃度を 285ppm とし、これを表現するためにバルブを調整して定常状態において水深が 285mm になるようにしておく。この定常状態を表す関係は、

$$q_{out} = q_{in} = Qr$$

2. 非定常状態を表す循環モデル（槌田による循環モデル）

まず、現在と産業革命以前の炭素循環の違いを人為的な CO_2 排出量の増加 Δq_{in} だけだとする。

産業革命以前と現在の自然起源 CO_2 排出量は変化せず、 $q_{in} = 210\text{Gt/年}$ 程度（炭素重量、以下同様）とする。現在の人為起源の CO_2 排出量は $\Delta q_{in} = 7.2\text{Gt/年}$ 程度、全 CO_2 排出量の $7.2/(210+7.2) = 0.033 = 3.3\%$ 程度である。

これを実験モデルで再現するためには、ポンプ出力を $217.2/210 = 1.034$ 倍、つまり 3.4% 程度だけ大きくしてやることに対応する。実験モデルでは、人為的 CO_2 排出量の増加をわかりやすく表現するために別系統のポンプを追加することにする。

産業革命以前の大気中の CO_2 濃度を 285ppm とすれば、人為的な CO_2 排出 7.2Gt/年 の増加で CO_2 濃度は $285 \times 1.034 = 294.7\text{ppm}$ に上昇する。増加量は 10ppm 程度に過ぎない。

これは、例えば実験モデルの産業革命以前に対応する定常状態における水深が 285mm だとすれば、ポンプ出力を 1.034 倍にすると徐々に水深が増え、 10mm 程度上昇した位置で再び定常状態になることに対応する（この程度の変化ではモデル実験の r はほとんど変化しないと考えて良い）。これは感覚的にもごく当然の結果である。

さて、ポンプ出力を $1 \sim 1.034$ 倍まで、徐々に増大させると、水深はこれに伴って徐々に増加し、ポンプ出力が 1.034 倍になった段階で、ほとんど同時に定常状態になり、やはり 10mm 程度上昇したところで止まる。つまり、ポンプの出力変動の履歴は最終状態に影響しない。

しかし、実際の現在の大気中 CO_2 濃度は 380ppm を越え、現在も増加しつつある。この違いは何によって生じているのであろうか？

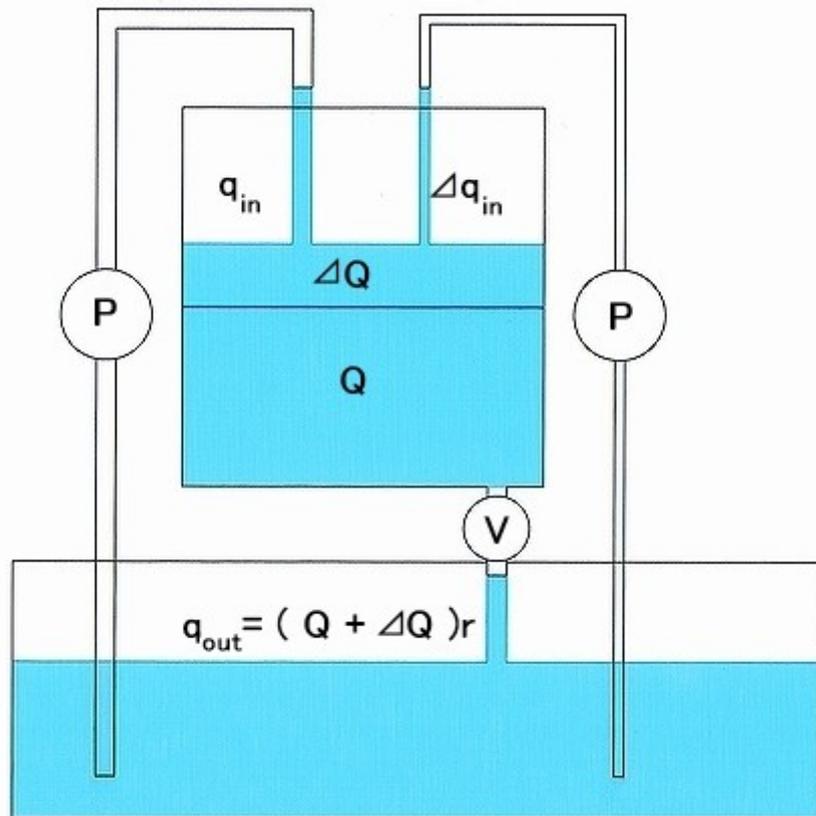
実験モデルで水槽に流入する水量を変化させずに現在の状況を再現するためには、水槽下面にあるバルブを絞って、水槽から流下してタライに還流する水量を減らしてやればよいことがわかる。バルブを徐々に絞って、水深が 380mm に達した状態で定常状態になる

ようにしてやれば現在の大気中 CO₂ 濃度を再現することが出来る。

つまり、交換率 r が変化するのである。具体的には、大気中 CO₂ 濃度は現在も上昇傾向を示しているので、

$$q_{out} = (Q + \Delta Q)r < q_{in} + \Delta q_{in}$$

となるように徐々にバルブを閉めていくことによって大気中 CO₂ 濃度が非定常に上昇する様子を表現することが出来る。



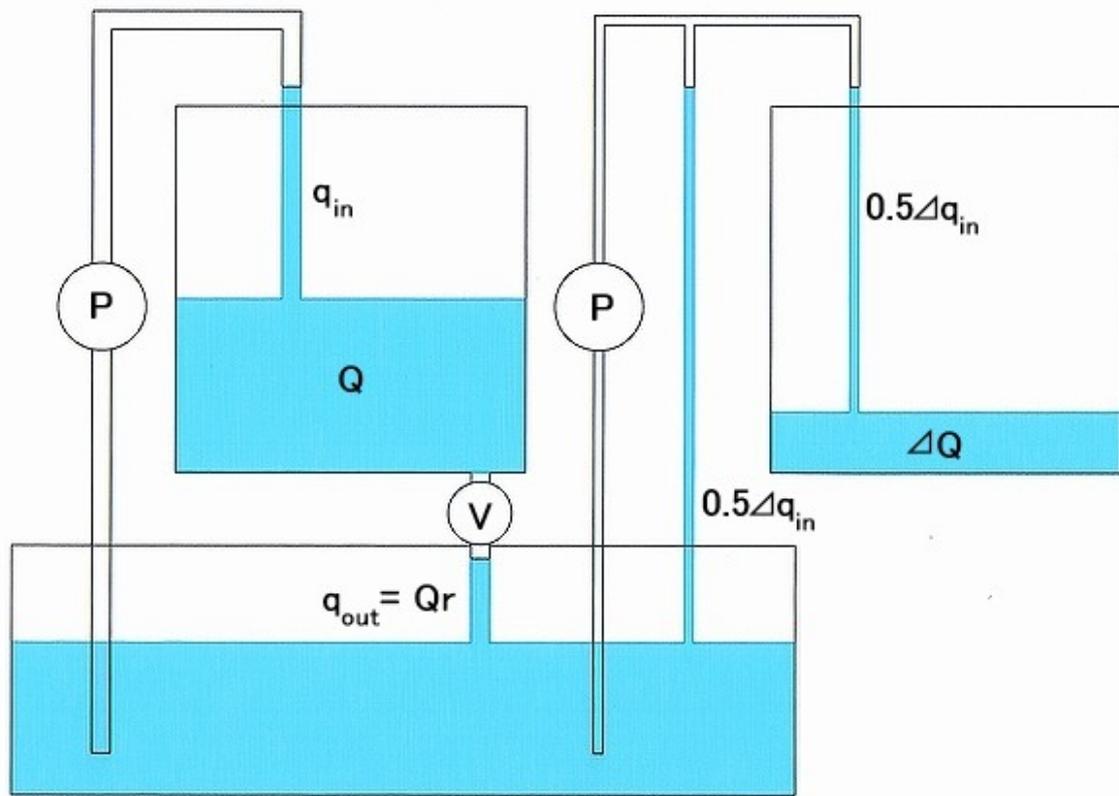
3. 非定常状態を表す蓄積モデル

これに対して、標準的な CO₂ 地球温暖化仮説では、産業革命以降の人為的な化石燃料の燃焼による CO₂ の排出量の 1/2 程度が選択的に大気中に蓄積され続けた累計として近年の CO₂ 濃度の上昇を説明しようとしている。これを蓄積モデルと呼ぶことにする。

蓄積モデルを表す実験装置では、同じ大きさの穴の開いていない透明水槽を追加しなければならない。

蓄積モデルでは、産業革命以前の自然現象である定常状態は、産業革命後も変化しないものとする。人為的に排出された CO₂ は、自然の CO₂ 循環とはまったく独立した振る舞いをするようになる。その意味で蓄積モデルは線形的な重ね合わせモデルと言うことが出来る。

人為的に排出された CO₂ の内、半分は大気中にとどまることなく、そのままタライに還流させる。残りの半分は穴の開いていない透明水槽に溜まり続けることになる。



蓄積モデルによる大気中 CO₂ 量は、次式で表される。

$$Q + \Delta Q = Q + 0.5 \sum \Delta q_{in}$$

$$\therefore \Delta Q = 0.5 \sum \Delta q_{in}$$

つまり、蓄積モデルでは自然現象である定常部分と人為的影響である非定常部分が独立に存在し、その線形結合によってモデル化されているのである。

しかし、このモデルには不可解な問題が残る。人為的な CO₂ 放出量の半分の $0.5\Delta q_{in}$ はいずれの透明水槽にも入らずに直接タライに還流する。これは現象的に何を意味するのか不明な部分であり、蓄積モデルの当初からの問題点であり、『ミッシング・シンク』と呼ばれている。

4. 考察

非定常な現在の大气中 CO₂ 濃度を表す全く異なる二つの実験モデルを作れることを示したが、では現象的にいずれが可能なモデルなのだろうか？

近年の Keeling による南極とハワイにおける二酸化炭素濃度の精密連続観測データから、

この遠く離れた二地点の濃度が極めてよく同期した変動を示すことから、大気は攪拌されてごく短期間で CO₂ 濃度分布は一様な状態になると考えられる。

つまり、地表面の CO₂ 排出源の如何を問わず、排出された CO₂ は大気という器（実験モデルでは透明水槽に対応）の中で一様に混合するのである。

蓄積モデルでは、自然起源の CO₂ と人為起源の CO₂ が全く別の水槽に注がれるため、一様に混合することはない。これは本質的な欠陥であり、蓄積モデルは現象的にあり得ないモデルである。現象的に可能なモデルは循環モデルなのである。

では循環モデルにおいて人為的に排出された CO₂ だけが選択的に穴あき透明水槽内に蓄積することがありえるのだろうか？人為起源の CO₂ の選択的蓄積は、エントロピーの立場から見ると、一旦大気中に放出された CO₂ が一様になる＝拡散エントロピーが極大になった状態から、人為起源の CO₂ を再び選別して選択的な操作を行うことを意味し、エントロピーの減少過程であり自然には起こりえないのである。自然起源の CO₂ も人為起源の CO₂ も等しく交換率 r で地表環境に還流すると考えるのが最も合理的である。

故に、大気中に存在する CO₂ の比率は、大気中に放出される自然起源の CO₂ 量 q_{in} と人為起源の CO₂ 量 Δq_{in} の比率と同じになるのである。つまり、現在の大気中 CO₂ 濃度 380ppm の内、人為起源の CO₂ 濃度は、 $380 \times (7.2 \div 217.2) = 12.6\text{ppm}$ に過ぎない。いくら人為的な CO₂ 排出量を減らしても、大気中の CO₂ 濃度はほとんど変化しないのである。

さて、では交換率 r の非定常な変化とは何を意味しているのか？交換率 r は地表面環境の大気中の CO₂ に対する吸収特性を示している。産業革命以前と現在の地表面環境の特性の相違が r の非定常な変化として表れているのである。つまり、地表面の都市化や農業用地の拡大、森林の減少、砂漠化の進行、そして気温の上昇などによって地表面環境が CO₂ を吸収しにくくなってきていることに対応するものと考えられる。

これまでの検討では蓄積モデルとの比較のため、地表面環境からの自然起源の CO₂ 放出量は変化しないとしてきた。しかし、実際には地表面環境の変化によって交換率 r が変化するとともに、自然起源の CO₂ 放出量 q_{in} が増加していると考えられる。近年の大気中 CO₂ 濃度上昇の主要な原因は、地表面環境の変化という自然要因なのである。

(2009/06/12)

参考：定常状態を表す等比級数モデル

ここでは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する。これは、実験モデルにおいて、透明水槽にポンプで連続的に水を注ぐ代わりに、一定の時間間隔で1年分の CO₂ 排出量に見合う水量 q_{in} をバケツで注ぐことに対応する。

初期状態において大気中に含まれている CO₂ 量を $Q_0(\text{Gt})$ とし（初期状態で水槽が空の場合には $Q_0 = 0$ ）、(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 $q_{in}(\text{Gt/年})$ とする。

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

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

...

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

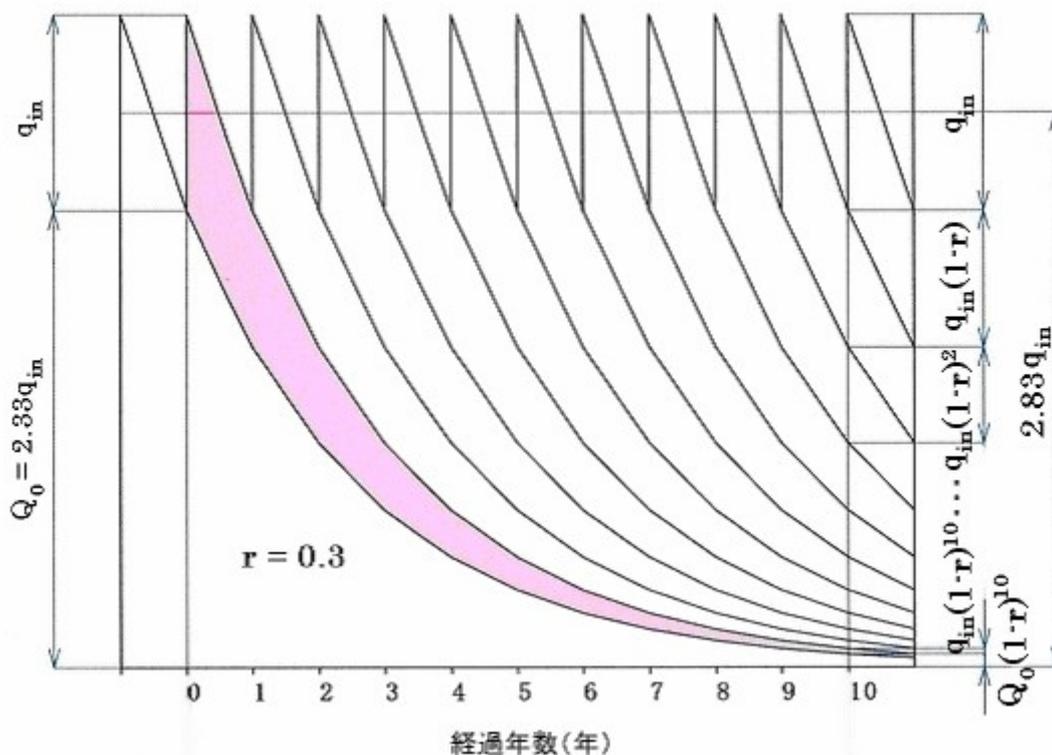
(n+1)年目期首の大気中の二酸化炭素量はn年目期末の式に q_{in} を加えることによって求められるので、等比数列の和の公式より次式で計算することが出来る。

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

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出来る。

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

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} と交換率 r だけで決まる。



上図は、『等比級数モデル』について、 $r = 0.3$ とした場合の定常状態になった場合の経年変化を $n = 10$ 年目まで示している。