

大空に消えた CO₂ の謎： 一つの思考実験(ヒストリーマッチング)

小川 克郎¹⁾

1. はじめに

「地球規模環境問題」は今や一種のブームの感をしていて、ちょっとした書店でも特別コーナーが設けられて相当数の書籍が並べられている。人々のこの問題に対するなみなみならぬ関心がうかがえる。地質調査所でもこの問題に係わる研究に真剣に取り組んでいる。その成果の一端はこれまでも幾度か地質ニュースで紹介されてきた。筆者もその中でこの問題へのアプローチのひとつの在り方としてストックとフローからなるシステムダイナミックスの手法の有効性を述べた(小川, 1991)。本稿ではこの手法を用いた地球の炭素循環モデルへの一つのアプローチについて述べてみたい。

2. IPCC リポートに記された行方不明の CO₂ の謎

「地球規模環境問題」には広範な問題が含まれているが、何と言っても「地球温暖化問題」が最大の関心を集めている。「石油や石炭といった化石燃料の燃焼により大気中に排出される膨大な二酸化炭素(CO₂)の温室効果によって地球は温暖化する。温暖化した未来の地球では、融け出した極域の氷床や海水の熱膨張がもたらす海面上昇により世界中の海岸平野が海になり、東京を始め世界の多くの大都市が海の下に沈む」といったシナリオが語られている。もしこのシナリオが本当なら大変である。

1990年に公表された IPCC(気候変動に関する政府間パネル)の報告書「気候変動の科学的評価」(IPCC, 1990)によると、2100年までの累積海面上昇量は65 cm, 全地球平均気温上昇は4°C(いずれも最良推定値)である。地質学的時間スケールで

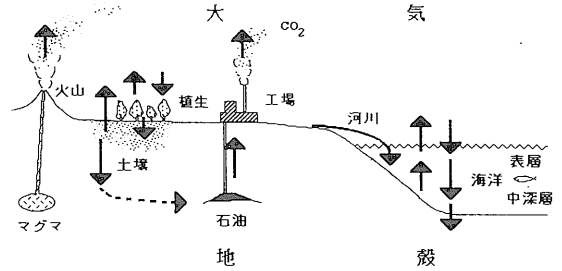
はこの程度の変動はさほどのものでもない。例えば、完新世初期(約1万-7千年前)の非氷河地域における海水準変動(上昇)は100年間で1.5 m 程度であったと推定される(大嶋, 1989)。これは世界各地の洪水伝説、国生み伝説として語り継がれてきた。しかし、有史以来に限れば未曾有の出来事と言えるだろう。地球は本来変動を抑制する自動機能(負のフィードバック機能)を備えているが、これほど早い変動に地球がその自動機能を発揮できるかどうかは怪しい。人類はノアの洪水の再現を見ることになるのだろうか? ひょっとすると、地球は人類の想像を越えた挙動にでる可能性だってありえる(正のフィードバック機能の発動)。残念ながら、人類のもつ地球に関するデータや理解はこうした予測を正確に行うには余りにも乏しすぎる。このことは IPCC 報告書のいたるところで確認できるであろう。その最たるものは「行方不明の CO₂」の一節(報告書 1.2.4.3: 人為起源二酸化炭素の再配分)であろう。これを要約すると次のようである。1980-1989年十年間の年当りの CO₂ 収支(単位は炭素換算10億トン: 以下ギガトンという)は人為的な大気への排出量 7.0 ± 1.5 (化石燃料からの排出 5.4 ± 0.5 , 森林破壊と土地利用による排出 1.6 ± 1.0 : 世界人口を約50億人とすると年間一人当りの CO₂ 排出量は約4.6トン。実に5トンダンパー一台分!), 大気中の滞留量 3.4 ± 0.2 , 海洋による取り込み量 2.0 ± 0.8 である。この数値を見て「オヤ??」と首を傾げる方も多いであろう。つまり、 $7.0 - (3.4 + 2.0) = 1.6$ に相当する CO₂ の行方が分からない(第1表)。これがしばしば指摘されている「行方不明の CO₂」である。何と、人為的な大気への放出量7.0ギガトンの約25%が何処かに消えてしまったのである。もちろん宇宙へ消えてしまったわけではないので地球

1) 地質調査所 所長

キーワード: 二酸化炭素, 大気, 地球環境, ヒストリーマッチング, 気圏, 水圏, 生物圏, 岩石圏, 炭素循環モデル

第1表 1980~1989年の CO₂ の収支(ギガトン/年)
IPCC, 1990

化石燃料から大気への放出量	5.4±0.5
森林破壊と土地利用による放出量	1.6±1.0
大気中の累積量	3.4±0.2
海洋による取り込み量	2.0±0.8
収支	1.6±0.8

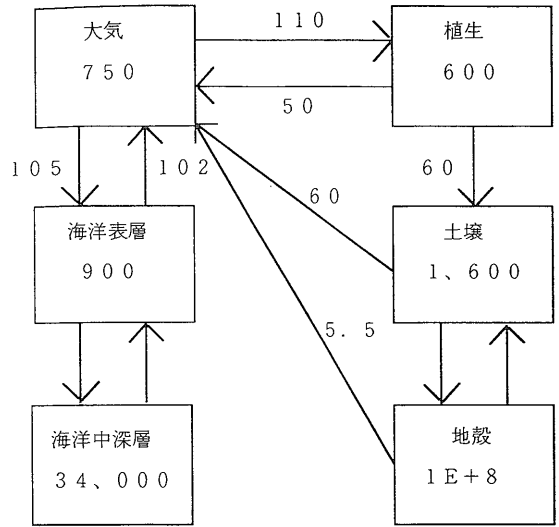


第1図 地球の炭素循環の簡単な概念図 矢印はフロー

という密室の中の何処かに潜んでいるはずである。地球という密室は岩石圏、気圏、水圏および生物圏の四圏で構成されている。CO₂はこの四圏を駆け巡って(循環して)いる(第1図)。各々におけるストック(蓄積量)とそれらの間のフロー(流れの量)とをモデル化したものは地球化学的炭素循環モデルとよばれる。大空に消えた行方不明のCO₂の謎に一その隠れ家—このモデルを使って迫って見ることにしよう。

3. 炭素循環モデル

幾つかの炭素循環モデルが提案されている。IPCC 報告にも一つのモデルが記されている。このモデルでは、堆積物、土壌及び腐植(以下単に土壌)、陸上生物(以下単に植生)、海洋表層(海洋生物を含む)、海洋中深層層並びに大気中のストックとフローが示されている。本稿ではこの IPCC モデルと若干数値が異なる一つのモデル(田中, 1989)に基づいて議論を進めることにする(第2図)。数値は炭素換算量で示されている。ストックの単位は10億トン(1ギガトン)、フローの単位はギガトン/年である。第2図のモデルでは、ストックの大きさは地殻(Y₃:後述)、海洋中深層(Y₆)、土壌(Y₅)、海洋表層(Y₂)、大気(Y₁)、植生(Y₄)の順番になっている。表層と中深層とを併せた海洋全体のストックは大気の約50倍である。次に、大気へ出入りするフローを見てみよう。植生は光合成作用の過程で大気からCO₂を吸収し(110ギガトン/年)、その一部は植生の呼吸作用等で大気に帰される(50ギガトン/年)。この差(60ギガトン/年)は一旦腐植として土壌にストックされた後、微生物による分解作用等によって再び大気に帰される。この大気→植生→土壌→大気の循環は収支がとれている。一方、大気と海洋表層の交換量はかなり大きい。低緯度海洋では



第2図 炭素循環モデル(田中, 1989よりアレンジ)
ボックスはストック(炭素換算値ギガトン)
矢印はフロー(炭素換算値ギガトン/年)
地殻から大気へのフローは化石燃料

海洋の全炭酸(後述)はCO₂として大気へ放出される(102ギガトン/年)。中高緯度海洋では逆に大気中のCO₂は海洋へ吸収される(105ギガトン/年)。この差3ギガトン/年だけのCO₂が海洋に吸収されている勘定になる。人為的なCO₂の大気への排出は化石燃料の燃焼によるもの5.5ギガトン/年、森林の伐採などの土地利用の変化によるものが1~2ギガトン/年、合計6.5~7.5ギガトン/年である。全体のフロー(行き来を数えて)は約500ギガトン/年であるから、人為的なフローは全体の1%程度である。以上を整理して収支を第2表に示す。

なお、行方不明のCO₂はここでは3.3~4.3ギガトン/年としてある。不確定要素が大きい海洋の吸収量(後述)はこの値に含めてある。

ここで、このモデルの信頼性について少し評価を

第2表 大気に係わる CO₂ の収支(ギガトン/年)
田中(1989)よりアレンジ
(海洋の吸収量は不確定要素が大きく収支の中に含めた)

人為的排出(化石燃料の燃焼)	+5.5
人為的排出(森林破壊等)	+1~2
人為的排出(大気への滞留)	-3.2(5.5の58%)
植生への吸収	-60
土壌からの放出	+60
海洋の吸収	(-3?)
収支	+3.3~4.3

しておこう。第2図のストックとフローのうちかなり信頼性の高いと考えられるのは大気のストック、および化石燃料の燃焼による人為的排出フローだけである。この外のストックやフローには誤差が大きい。このモデルを記した著者(田中, 1989)は地球上での炭素循環についての人類の理解はまだ極めて不十分であると述べている。その言葉通り、このモデルに示されたストックとフローには全体的に不確定性が大きい。例えば、海洋の吸収については推測値或は期待値であると著者は率直に述べている。確定的にするだけの全球的な観測データが現状では極めて不十分であることがその理由である。しかしながら、このモデルは現在人類が手にすることのできる最良のモデルの一つであるに違いない。本論ではこのモデルに基づいて議論を進めて行く。

さて、人為的に大気へ排出された CO₂ の可能性のある行き先—隠れ家—は、先に述べた信頼性評価を勘案すれば、植生、土壌及び海洋である。しかしながら、そのいずれもがこれに対して否定的或は懐疑的な理由を持っている。まずこのことを説明しておこう。

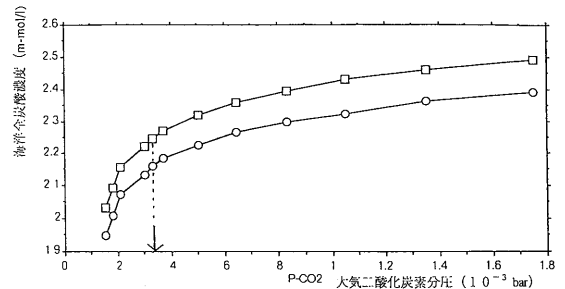
4. 植生、土壌の CO₂ 吸収能力についての疑問

過去数十年間の人口の急激な増加と工業化の著しい進捗に伴い、熱帯雨林を始めとして森林の伐採が急激に進められた結果、植生や土壌の CO₂ 吸収能力は急速に逓減している。一説によれば、1980年代の10年間で失われた森林は5%以上にも達すると言われている。失われた森林と土壌はそれまで組み込まれていた大気→森林→土壌→大気という物質循環から外れて、そこに有機物として含まれていた炭素は無機化され CO₂ として大気に一方的に帰さ

れる。つまり、現在の森林や土壌は CO₂ の吸収源であるどころか、放出源となっている。従って、人為的に排出された CO₂ を吸収する植生や土壌の能力は既に失われている。

5. 海洋の CO₂ 吸収能力についての疑問

しからば海洋はどうであろうか？表層および中深層海洋に含まれる CO₂ は大気の50倍もある。こちらは何とかなりそうではないか？ところが、こちらにも困った事情がある。CO₂ の大気-海洋の交換反応において海洋の CO₂ 吸収能力におおきな限界があることが解かっている。海洋の緩衝作用と呼ばれる限界である。海中に入った CO₂ は炭酸(H₂CO₃)、炭酸水素イオン(HCO₃⁻)、炭酸イオン(CO₃⁻)及び炭酸ガス(CO₂)に分かれて海水中に溶解する。これらの総量は全炭酸と呼ばれる。大気中の CO₂ とそれに平衡する大気に接する海洋の全炭酸濃度とは海洋の炭酸アルカリ度(HCO₃⁻ の濃度と CO₃⁻ の濃度の2倍の和で定義される)をパラメータとして一意的に決められる。第3図(近藤, 1982よりアレンジ)は大気中の CO₂ (横軸：炭素換算値)と大気に接する海洋の全炭酸濃度(縦軸)の関係を示している。この曲線の勾配が大気中の CO₂ の増加に対する海洋の吸収量を示している。勾配の逆数は緩衝因子と呼ばれる。大気中の CO₂ 一単位の増加は緩衝因子の逆数だけの単位の海洋中の全炭酸の増加で釣り合ってしまう。この図には CO₂ の現在値も合わせて示しておいた。この現在値での緩衝因子は約10である。即ち、大気中の CO₂ が10単位増加した場合、海洋へはその10分の1、即ち、1単位しか吸収



第3図 海洋の緩衝効果(近藤, 1982よりアレンジ)
海洋の炭酸アルカリ度 ○ 2.4 m-eq/l の場合 □ 2.5 m-eq/l の場合
矢印は現在値

されない。緩衝因子が大きいほど大気から海洋への CO₂ の吸収は困難となる。第 3 図で右に行くほど (CO₂ 量が増えるほど) 緩衝因子は大きくなることに注目しよう。例えば、大気中の CO₂ が現在の 2 倍まで増加した場合の緩衝因子は約 17 となり、ますます海洋の吸収が減ることになる。

この緩衝効果の結果、大気から海洋への吸収は極く限られている。これが、海洋の CO₂ 吸収能力についての疑問への解答である。

さて、第 2 図の海洋表層から中深層へのフローは、地質学的時間スケールでは、大気中の CO₂ の地殻への固定プロセスとして大きな役割を持っている。生物の発生以前の地球創成期においては地球大気の大半が CO₂ であったと想定されている。そうした CO₂ は地球創成期の初成的なものを除けば、地球内部から主として火山活動という形で大気中へ放出されたものであり、現在もこの放出は継続している。約 38 億年前と推定されている原始的生物(藻類)の発生・繁茂に伴い、その光合成作用によって CO₂ は減り酸素が増え海の酸性度が次第に下がるという経緯を辿ることになる。約 6 億前石灰質の殻を持った貝類の出現により有機起源の石灰岩の形成が加速された結果、光合成による酸素の大気への供給と大気中の CO₂ の地殻への固定が同時に進められていった。このようにして地球大気の組成は抜本的に組み替えられ現在の組成へと帰結していった(大嶋, 1989)。第 2 図の地殻中の炭素の膨大なストックは主にこのような地質学的過程で実現されたものである。これについてはブディコほか(Budyko et al, 1985)の労作を参照されたい。むろん、このような生物による海中の CO₂ の海底への固定はマリンスノーで知られている微小石灰質生物死骸の深海への降下や造珊瑚礁作用として続けられている。しかしながら、このフローは短期的には量的にそれほどではないので、当面の行方不明の CO₂ の収支にはそれほど影響しないようである。

以上のように、行方不明の CO₂ の隠れ家は状況証拠—確定的な観測値が入手できない限りあくまで状況証拠に止まる—で見るとかぎり何処にもありそうにない。本当にそうだろうか？

それではそろそろ本稿の核心であるヒストリーマッチングによる思考実験へと入ることにしよう。むろん、確定的な証拠がない現段階ではこの方法を使

えば「CO₂ 行方不明事件」の総てが解かってしまふなんてことはありえない。状況証拠にまた一つの状況証拠を重ねるに過ぎないであろうことは最初からお断りしておく。しかしながら、こうした思考実験がこの事件の解決へ向けての将来の観測データの蓄積に幾許かの指針を与える役割は果たせるかも知れないと思っている。

6. ヒストリーマッチングによる思考実験

第 2 図に示されているストックとフローからなる炭素循環システムを一連の微分方程式からなる数学的モデルで表現してみよう。数学モデル化には簡単なものから複雑なものまで様々な段階があり得るが、ここでは島津ほか(Shimazu et al, 1967)にならって極く簡単な化学反応モデルを採用する。第 2 図の大気(Y₁)、海洋表層(Y₂)、地殻(Y₃)、植生(Y₄)並びに土壌(Y₅)の五つのストック(Y_i; i=1, 5)からなる簡単なシステムで表現する。これらストックの間にフロー(Y_{i,j}; i, j=1, 5, Y_i から Y_jへ)が存在する。ストックとフローの関係は一種の化学反応と考えればその反応の係数は交換係数(K_{i,j}; i, j=1, 5)と置くことができる。炭素の質量保存則を考慮すればこの数学モデルは次のように表現できる。

$$\begin{aligned} dY_1/dt &= -K_{12} * Y_1 + K_{21} * Y_2 - K_{14} * Y_1 * Y_4 \\ &\quad + (K_{51} * Y_5 + m_{51}) + m_{31} \\ dY_2/dt &= K_{12} * Y_1 - K_{21} * Y_2 \\ dY_3/dt &= -m_{31} \\ dY_4/dt &= K_{14} * Y_1 * Y_4 - K_{45} * Y_4 \\ dY_5/dt &= K_{45} * Y_4 - (K_{51} * Y_5 + m_{51}) \end{aligned}$$

初期条件(時間=0 の条件)

$$t=0 \text{ で } dY_i/dt=0$$

ただし、

m₃₁ = 化石燃料の燃焼によって地殻から人為的に大気へ放出された炭素量

m₅₁ = 森林伐採等の土地利用の変化によって土壌から人為的に大気へ放出された炭素量

Y には遅延効果(後述)が含まれていてよい。また、海洋の緩衝効果や森林破壊の効果は交換係数のなかに組み込む。

(以上第 4 図参照)

この式は基本的には化学反応の一次式

$$dY_i/dt = -K_{ij} * Y_j$$

の形を取るが、大気(i=2)と植生(i=4)の間だけは化学反応の二次式

$$dY_1/dt = -K_{14} * Y_1 * Y_4$$

の形を取っている。

この間のフローはCO₂の送り手、即ち大気中のストック(Y₁)、だけでなくCO₂の受け手、即ち植生のストック(Y₄)、の双方の関数と考えられるからである(Shimazu et al, 1967)。

第4図では幾つかのストックとフローが考慮されていない。例えば、火山活動によるマントルからのCO₂の大気への放出、陸から海への河川等を介したCO₂の運搬供給(侵食・風化・堆積作用)、海洋表層から中深層への全炭酸の移動、海洋における石灰質生物の沈殿・堆積等である。本稿のヒストリーマッチングが目指している比較的短期間のシステム挙動(パフォーマンス)の解析にとってはそれらの量が小さく無視できる場合のほか、たとえ大きくともストック中の滞留時間が長く(居候を決め込んだ訪問客のようなもの)遅延時間(居候がやって来てからでて行くまでの時間)が大きいものは短期的にはフローの変化を生じさせないと考えて無視したのものもある。むしろ、もっと精密なモデルではこうしたフローをシステムに取り込む必要がある。その

とき、ここで無視したフローの影響が意外に大きいという結果が得られるかも知れない。

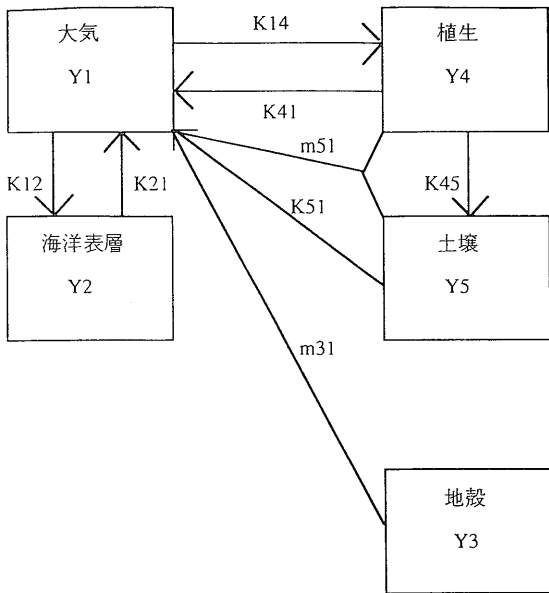
さて、このモデルを用いてヒストリーマッチングを実施してみよう。ヒストリーマッチングというのは石油や地熱といった流体資源貯留層の生産性評価にしばしば用いられる方法である。過去の流体資源の生産実績(不確定要素は殆どないヒストリーデータ)を説明できるような貯留層の数学的モデルを求めておいてから、そのモデルを用いて将来の生産挙動(プロダクションパフォーマンス:不確定要素がある)を評価する方法である。将来予測に過去の生産実績を使うことからヒストリー(歴史)という言葉が用いられている。

それでは、我々のモデルで不確定要素が少ないヒストリーデータはあるだろうか?かなり不確定要素の少ないと思われるヒストリーデータは存在する。それは大気のストック(Y₁)と人為的な排出(m₃₁, m₅₁)である。大気のストックは最近の観測値と世界中の氷河の中に閉じ込められた空気の泡から過去に遡ってかなり精度良く求められている。また、人類の化石燃料の利用の歴史から m₃₁ を、森林利用の歴史から m₅₁ が求められている。幾つかの値が公表されているが、ここではホートンがまとめたもの(Houghton et al, 1989)を用いることにする(第5図)。

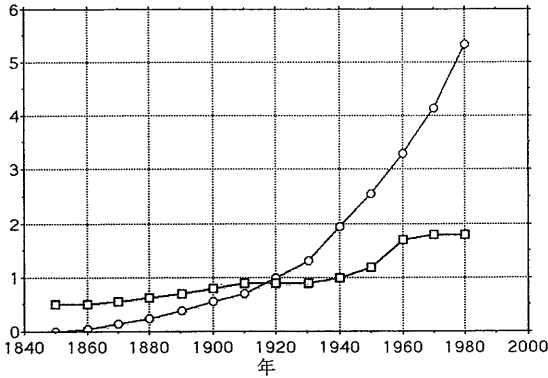
このほかのヒストリーデータは得られないので、数多くのモデルを求めて既知量(第2図に示した現在のストックとフロー並びにヒストリーデータ Y₁, m₃₁, m₅₁) を良く満足するものを選ぶというヒストリーマッチングの定石を採用しよう。

さて、ヒストリーマッチングでは初期状態の設定も重要である。初期状態では総てのストックとフローが定常的(動いていても、即ちフローが存在していても、時間的に変化しない動的平衡状態)であると仮定できればシステムの振る舞いが数学的に安定する。先に述べた流体資源の場合には、生産開始時(既知)を初期状態と設定すればいいので特に問題は生じない。しかし我々のモデルでは初期状態が定常的であるとはかならずしも保証されていない。

以上の事情を勘案して、初期状態を1850年に選ぶことにした。第5図では1850年頃は森林伐採によるCO₂の大気への排出が化石燃料の燃焼によるものよりは上回っている。そのうえ、後者は石炭の

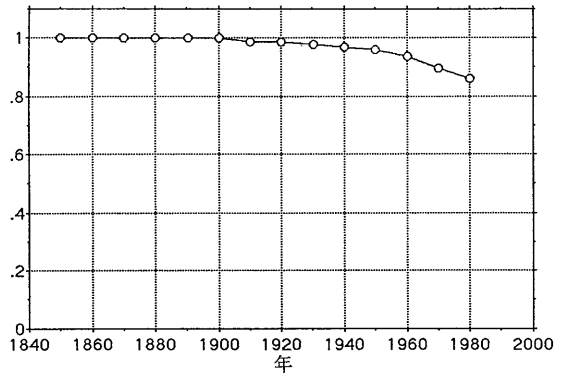


第4図 ヒストリーマッチングに用いた炭素循環モデル
Yはストック
Kはフローの交換係数
mは人為的なフロー



第5図 大気中への人為的 CO₂ 放出のヒストリーデータ (1950-1980)

○ 化石燃料燃焼(m₃₁) □ 土地利用の変化(m₅₁)
 単位は炭素換算値ギガトン/年
 (Houghton et al, 1989よりアレンジ)



第6図 大気と植生間の交換係数 K₁₄, K₄₁ の1850年を1に基準化したヒストリーデータ(1850-1980) : 標準値

本格的利用が始まった18世紀中葉から徐々に増加しているが、1850年頃ではまだ増加量はそれほどではない。従って、初期条件の設定に都合の良いように1850年前後のデータを若干修正しても大勢には影響を与えないとしてよさそうである。

前置きが少々長くなり過ぎたが、いよいよモデルをコンピュータ(何と我が家のパソコン!)で動かしてみよう。消えた CO₂ の行方を追うこの思考実験の精神に基づき、ターゲットを森林破壊の効果と海洋の緩衝効果(いずれも前述)に絞ろう。およそ100ケースに及ぶヒストリーマッチングを行ったが、本稿ではそのうちの代表的なモデルを紹介しておく。

7. ヒストリーマッチングの結果

ここではそれぞれ特徴のある四つのモデル、即ち、モデル-0, 1, 2, 3 について述べよう。これらのモデルは、海洋の緩衝効果並びに最近数十年の森林破壊の効果の感度解析(センシティビティスタディ)を目的として設定されている。この二つの効果の組み合わせは次のとおりである(第3表参照)。

モデル-0：海洋の緩衝効果はないが森林破壊の効果は標準程度に存在。

モデル-1：海洋の緩衝効果があり、かつ森林破壊の効果は標準程度に存在。

モデル-2：海洋の緩衝効果はあるが森林破壊の効果は存在しない。

モデル-3：海洋の緩衝効果があり、かつ森林破壊の効果は標準の50%程度存在。

ここでは、海洋の緩衝効果(第3図)は大気-海洋の交換係数 K₁₂, K₂₁ に組み込まれている。また、森林破壊等の植生面積の通減効果は大気-植生の交換係数 K₁₄, K₄₁ を第6図に示すようなヒストリーデータ(時間の経過とともに変化する量)として組み込まれている。熱帯雨林の累積破壊が既に40%に達しているという報告、熱帯雨林を含めた全球森林の破壊は既に20%に達しているという報告があるが、沙漠化を含めた全球的な植生面積の通減については余りよい資料が無いようであるので、既知量ではなく未知量として扱う。第6図の曲線は1850-1980年間の植生面積の通減が14%であり、その傾向は人口の増加に比例して森林伐採及び沙漠化が近年一層顕著になっているという仮定で作成したものである。この曲線をここでは「標準」と呼ぶことにして、標準の倍或は半分といった場合についてもヒストリーマッチングを行ってみた。

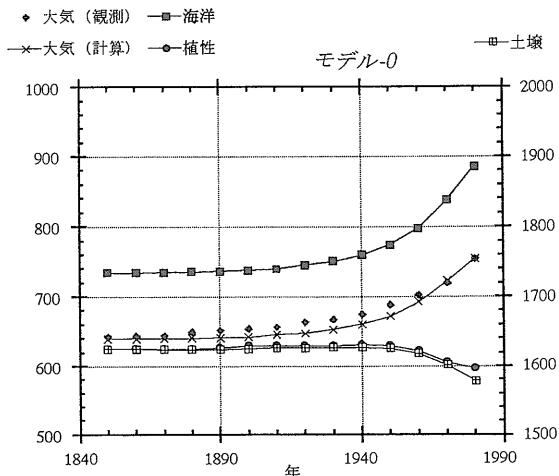
結果を要約すると以下のとおりである。

モデル-0(第7-0図)

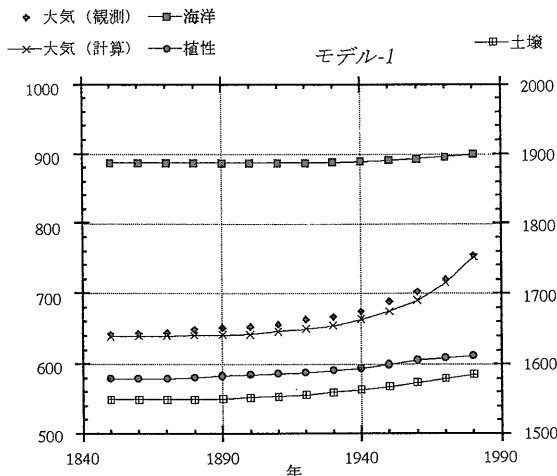
海洋の緩衝効果はないので放出 CO₂ は大気と海

第3表 モデルの特徴

	海洋緩衝効果	森林破壊効果
モデル-0	なし	標準
モデル-1	あり	標準
モデル-2	あり	なし
モデル-3	あり	標準の50%



第7-0 図 ヒストリーマッチングの結果：モデル0
単位は炭素換算値ギガトン



第7-1 図 ヒストリーマッチングの結果：モデル1
単位は炭素換算値ギガトン

洋で吸収する。森林破壊の効果がこれを助長して植生及び土壌中の CO₂ も大気中に大量に放出される。大気のヒストリーマッチングは良好である。130年間(大部分が1930-1980年の最近の50年間)の CO₂ 吸収量は大気が115ギガトン、海洋が153ギガトンである。海洋の吸収量が大きすぎると思われるが、これを実現する何らかのメカニズムの可能性があればこのモデルは生き残る(後述)。

モデル1(第7-1図)

このモデルは今回のモデルのなかではもっとも妥当なものである。その特徴は次の通りである。

1) 海洋表層の緩衝効果の結果、海洋表層への CO₂ 吸収が極めて小さい値に押さえられているにも係わらず大気のヒストリーマッチングは良好である。

2) 大気からの炭素吸収能力の低下を生む熱帯雨林の伐採による植生の減少並びにこれに伴う土壌中の炭素の大気への排出・流失効果にもかかわらず地球全体としての植生は活性化しており、これに伴い土壌中の炭素量も増加している。このモデルは行方不明の CO₂ は熱帯雨林と土壌の消失にも係わらずその他の地域の植生と土壌に吸収されていると解釈される。即ち、地球の植生総量は植生面積と単位面積当りの植生密度の積であるから、森林破壊等で失われた植生面積はその他の地域の植生密度の増加(恐らく可能性は少ないが、植生面積の増加もあるかも知れない)で補っているという解釈である。こ

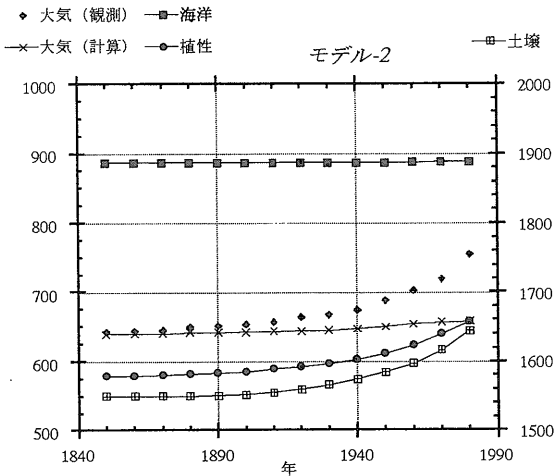
の解釈は果たして可能であろうか? 専門家ではない筆者には解からない。しかし、このモデルにおける植生密度の増加量は50年間で15-20%、即ち、10年間で3-4%程度である。3年前には100本だった我が家の庭の雑草が今年には101本生えていた(10年で3-4%増)なんてことが一体どうやったら解かるのだろうか?(そういえば最近庭のミミズとモグラが増えている。これも地球環境に関係ありか?)まして我が家だけでなく地球全体の場合は?ともあれ、地球規模での現在の観測精度の S/N 比(信号対雑音比)で検出可能かどうか、また、検出するためには何をすべきかを今後検討してみる必要があろう。なお、S/N 比の問題はすべてのストックとフローの観測に当てはまる。

モデル2(第7-2図)

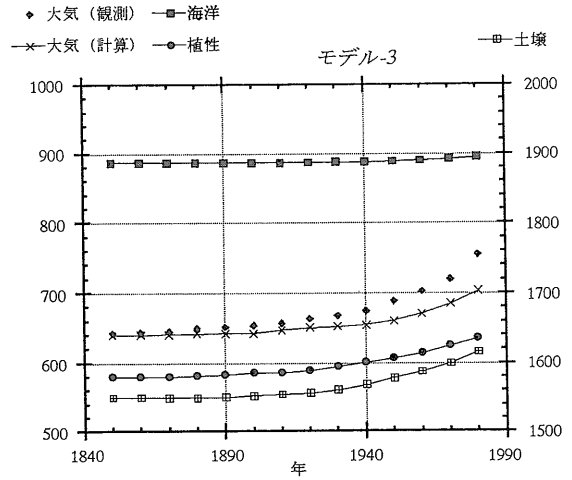
海洋の緩衝効果はあるが森林破壊の効果は存在しないので、放出された CO₂ の大部分が大気に残らず植生並びに土壌に吸収されてしまう。この効果が大きく、大気のヒストリーマッチングは良好ではない。このモデルは生き残れそうにない(伐採されていない地域の植生の増加率は10年間で10%程度なのでこれなら我が家でも雑草退治がだんだんきつくなると気づく可能性がありそうだ。しかし「年のせい」ということもあるではないか?)。

モデル3(第7-3図)

海洋の緩衝効果があり、かつ森林破壊の効果は標準の50%程度存在というモデル1の変形である。



第7-2図 ヒストリーマッチングの結果：モデル-2
単位は炭素換算値ギガトン



第7-3図 ヒストリーマッチングの結果：モデル-3
単位は炭素換算値ギガトン

森林破壊の効果が小さいので、モデル-2と同様に放出されたCO₂の大部分が植生並びに土壤に吸収される。この効果がいまだ強く、ヒストリーマッチングは良好ではない。このモデルは生き残れそうにない。このモデルは現在の大気中のCO₂の急激な増加に森林破壊の影響がかなり大きいということを示唆しているのではなからうか？

なお参考のために1850-1980年の間に大気中に放出されたCO₂(第5図)の総量(炭素換算194ギガトン)の再配分率を第4表に示しておいた。

8. 海洋の吸収能力についての補足

今回は海洋を表層に限り、しかも全地球一様と仮定した。明らかに、このモデルは粗すぎる。その理由を述べよう。大まかに言って、低緯度では海洋から大気へ、中高緯度では大気から海洋へというCO₂フローが実現している(田中, 1989)。つまり、大気と海洋表層のCO₂分圧は低緯度では海洋>大気、中高緯度者では大気>海洋となっている。これ

は大気と海洋表層(全体)の間に化学平衡が成立していないことを示している。この非平衡の原因は海洋表層の大循環の速度が大気・海洋表層のCO₂交換速度を上回っていると考えればいだろう。

このことを北半球の太平洋を時計周りに循環する海流を例に考えてみよう。西太平洋の低緯度と中高緯度の中間の何処かで(多分台湾の東方海域)は大気と海洋表層のCO₂分圧は釣り合っているはずである。その辺りから黒潮として日本列島の東方を北上するに連れて海水温度が下がり海水のCO₂溶解度は増える(本来コーヒーに入れる砂糖のような固体とは逆にCO₂のような気体は温度が低いほど液体によく溶ける)。これに伴い大気から海洋へCO₂は溶け込んで行く。しかしこの交換の速度は遅く北上するに連れて次第に増加して行く溶解度について行けず不飽和状態が発生する。このようにして最も低温のアリューシャン海流にかかるころには20ppm以上のCO₂分圧差(大気>海洋)が生じてしまう。ここから南に転じてカリフォルニア海流として南下するに連れて再び海水温度は上昇し海水の溶解度は減り始める。カリフォルニア半島西方で方向を南西に転じて北赤道海流に入るころ大気と海洋表層のCO₂分圧は再び釣り合う。更に赤道付近を西進するに連れ、海水温は更に上昇して海水のCO₂溶解度は減り続ける。これに伴い海洋から大気へとCO₂は放出される。しかし、北の海での状況と同じく、やはりこの交換速度は海流の移動速度に比べ

第4表 モデルのCO₂再配分率1850-1980(単位は%)

	大気	海洋	植生	土壌
モデル-0	59	79	-14	-24
モデル-1	58	8	15	19
モデル-2	10	1	41	48
モデル-3	33	4	29	31

て遅く、海洋には CO_2 過飽和状態が発生し、20 ppm 以上の分圧差(海洋 > 大気)が生じてしまう。太平洋の西端まで辿り着いた海流は方向を北に転じて再び黒潮となって台湾東方海域へと回帰する。

海洋循環速度が大気-海洋 CO_2 交換速度を上回るのが原因のこうした非平衡は地球という自然によく見かけられる遅延現象の一つであり、その意味で、自然の営みと言ってよいだろう。太古の昔から地球に存在していたのであろう。

さて、この自然非平衡状態にある大気-海洋境界面の大気側に人為的な CO_2 の負荷がかけられるとどうなるだろうか。非平衡は低緯度では遙減し海洋から大気への CO_2 放出は減少する一方で、中高緯度では逆に非平衡は加速されて大気から海洋への CO_2 の吸収は増加すると理論的には考えられる。なぜなら、一般のフローの原理(例えばダルシー流)に従ってフローの大きさはマイクロには大気-海洋境界面の CO_2 分圧勾配に比例すると考えられるからである(近藤, 1982)。従って、大気と海洋の CO_2 交換係数(K_{12} , K_{21})は大気-海洋境界面(海面)直下海中における炭素(全炭酸)の鉛直移動(攪拌)速度に依存することになる。この速度は波の荒さ(風速に依存)や生物の活動によって主に決まる。この両面で荒くかつ栄養に富んだ寒い海では大気からの CO_2 吸収は有利ではなからうか。

原理的には考え難い海洋の緩衝効果を見逃したモデル(モデル-0)をヒストリーマッチングに残したのは以上のような考え方を考慮したからである(むしろ、こうした非平衡交換過程を厳密な形でヒストリーマッチングに組み込むのが理想である。今後の課題の一つである)。

ところで、海洋の深層大循環は表層が主体の表層大循環とは全く異なるパターンをもっており、しかも CO_2 のフローでは重要な役割をもつものであるにもかかわらず、そのモデル化は今回考慮しなかった。この作用は大きな遅延をもっているので短期モデルでは無視しえるかも知れないが十分な検討はしておくべきであろう。

以上のように、低緯度と中高緯度の大気-海洋 CO_2 交換反応は著しい差異があるので分けた扱いが必要であろう。

9. 今後の課題

先にも述べたが、ヒストリーマッチングの究極の目的は未来予測である。しかし、そのためには過去を十分説明できるモデルを発見しておかねばならない。本稿では肝心の未来予測については述べなかった。それには、いくら思考実験とはいえ、モデルが十分には成熟していないと思われたからである。それに、地質学、気象(候)学、海洋学、農学といった多面的な学問分野の理解を必要とする炭素循環のヒストリーマッチングを行うには筆者の知識、能力が余りにも乏しすぎると痛感した。とても一人でできることではない。この為には学際研究グループを作るのがよいだろう。まず出来ることから始めようと、地質調査所に研究グループを作ることを提案した。幸い、若手を含めて多くの研究者が関心を持ってくれた。その中には、船に乗って地球環境テーマを推進している人もいれば、数学やコンピュータに強い人もいる。これからは、このグループを核として、出来ればその輪を学際的に拡げて、ヒストリーマッチングを発展させてゆきたいと思っている。筆者には色々夢がある。その夢の一部を語って本稿を終わることにしよう。

1) 今回のモデルは質量保存則だけに準拠した物質循環のモデルであるが、この同じ手法はエネルギー保存則を加えた物質・エネルギー循環モデルにも適用できる。エネルギーを加えたシステムの非線形性は物質単独のシステムよりは遙に強いと予想されるので、取り扱いはかなり厄介とならう。グリーンハウス効果を取り入れた地球温暖化問題へのアプローチにはエネルギー循環を考慮したシステムが不可欠であるので、物質循環モデルをまず固めておき、その後でエネルギーを取り込んだシステムへと進みたい。ただ、この際注意すべきは、このようなシステムの複雑化が入手可能なデータや人間の自然システムモデル化能力に十分見合って有効であるか否かの評価検討を良くしておく必要があるだろう。人間の知識や知恵の限界をわきまえない無理な高度化はかえって災いになるというのが地球環境問題の教訓であった。

2) 最古の文明の発祥の地と言われるメソポタミアに人間が集まってきて最初の社会を作ったのは紀元前1万年の頃であったという。この時から森

林破壊等の自然環境の破壊が始まったらしい。しかし、人間が最初に地球規模での大規模な影響を自然環境に与えたのは古代ローマ帝国の頃であったという。帝国の領土拡大に伴い、現在のヨーロッパを中心に燃料調達や牧畜のために大規模な森林破壊が繰り返されたと歴史書は記す。恐らくかなりの CO₂ が大気中に放出されたに違いない。しかし、そのわりには大気中の CO₂ は増えなかったようである。その理由は明らかではないが、恐らく、人為的 CO₂ 放出源が現在のように複合的なものではなく森林に限られていたことに加えて、その後地球を襲った低温期(小氷河期)が大気の CO₂ を減らしたという幸運(?)も考えられる(大嶋)。このような歴史過程をできるならヒストリーマッチングで追ってみたい。

3) 筆者が以前本誌で述べたように、「地球環境問題」は基本的には次の二つの前提で対応を考えるべきである。即ち、

一) 資源論の立場では人類は当面(半世紀以上)化石燃料に依存せざるをえない、

二) 地球の病気の治癒はそれ自身が持つ治癒の能力を活用するのが一番よい。

今回のモデルでは大空に消えた CO₂ の隠れ家は植生、土壌および海洋が少しずつ分け合っている(例えば、モデル-1)と考えられるのがよいように思われる。しかし、すでに述べたように CO₂ の吸収に関しては海洋には緩衝効果という大きな限界があり、またこのまま森林破壊が続けばそれ以外の場所での植生や土壌の吸収能力も遅かれ早かれお手上げになるだろう。そうなったら人類が排出する CO₂ は大気中に留まるしかなく、地球温暖化は予測以上に急速に進む可能性だってありそうである。そうした状態がどのような条件(例えば大気中の CO₂ が現在の倍の 700 ppm になったとき未だ草や木や土壌が助けてくれる条件を持っているだろうか?)の時やって来るかはいまのところ予測がつかない。人為的行為のいくつかの予測シナリオを作り過去から未来に到るヒストリーマッチングを実施してみよう。その結果から、ひょっとすると地球自然システムのボトルネックが押さえられその時の条件が解かり、従って、病んでいる地球が持つ自己治癒能力に添った

対応策が考えられるかも知れない。今回のヒストリーマッチングの結果からも森林破壊の効果が大きいことは容易に想像がつく。伐採はしたがまだ土壌流失にはいたってない(救いようのある)森林は多いはずである。成熟した森林の CO₂ 固定能力は小さいが、成長期の森林のそれは大きいことを思い起こそう(大嶋)。これは地球の持つ自然治癒の能力に違いない。また、珊瑚礁の生物学的 CO₂ 吸収固定能力を利用するのも、その限界をわきまえるかぎり、地球が持つ自己治癒能力に添った対応策の一つであろう。

10. あとがき

このヒストリーマッチングは地質調査所首席研究官大嶋和雄氏との頻繁な意見交換の中で生まれた。実に多くのことを同氏から教わった。重要なものは本文中に(大嶋)と記した。その意味では、本稿は同氏と筆者の共同生産物と言ってもよい。ここに記して感謝したい。ヒストリーマッチングを始めてみて当初は予想だにできなかった様な数多くの解からない、知りたいことが出てきた。突飛な質問をして大嶋氏を困惑させたこともしばしばであった。恐らくこれがヒストリーマッチングの最大の成果ではなかったかと思っている。

文 献

- Budyko, M. J (1985) : 地球大気の世界史。朝倉書店。
 Houghton, R. A and Woodwell, G. M. (1989): Global Climate Change. 別冊サイエンス93, 7-17.
 IPCC 第1作業部会(1990) : 気候変動についての科学的評価。
 近藤純正(1982) : 大気境界層の科学(気象学のプロムナード4)。東京堂出版。
 小川克郎(1991) : 地質調査所における地球温暖化問題への取り組み。地質ニュース, no. 445, 10-13.
 大嶋和雄(1989) : 地球温暖化の原因と対策について。地質ニュース No. 422, 34-45.
 Shimazu, Y and Urabe, T. (1967): Some numerical experiments on the evolution of the terrestrial atmosphere and hydrosphere. Jour. Phys. Earth, 15, No. 1, 1-18.
 田中正之(1989) : 温暖化する地球。読売科学選書23。

OGAWA Katsuro (1992): CO₂ history matching.

<受付: 1992年10月6日>