

国際シンポジウム第1日目 講演2

## 地球温暖化のコンピューター実験

松野 太郎\*

### 1. はじめに一温暖化予測のカオス

今回のシンポジウムのキーワードは、「自然科学と人文社会科学の協力・融合」、「複雑系とカオス」などではないかと思う。私の担当する地球温暖化問題は、自然科学の研究成果と社会科学（政治・経済学）に立つさまざまな対応策、そして地球環境問題を生むに至った人間の行動・その規範としての倫理にさかのぼった人文学の視点からの考察など、まさに学際的な検討を要する課題であると思う。しかし、もう一つのキーワードである複雑系とカオスという視点から見て、地球温暖化現象がその例であるかという点、少なくとも私はそう思っていない。実際、これからお話しするのは地球温暖化とそれに伴う気候変化の予測であるが、我々は、精度はともかく予測が可能であると思ってコンピューター実験を行っている。その結果も、世界中の研究機関の結果が確かにまちまちではあるが、カオスの特徴である「小さな違いから予測もつかない異なる結果が出る」というものではない。すなわち小田先生の言われる「ロレンツの魔物」の棲む世界ではない。

地球温暖化予測は、大筋において予測可能でありカオスではないと言ったが、カオスの要素が全く無いというわけではない。ロレンツ・システムが気象予測のモデルとして登場したことからもうかがえるように、気象・気候の変動を支配する方程式は非線形であるから、程度の大小は別としてカオス的なものが含まれているのは当然である。現在知られているものの中で、大きさから見て、また、もし本当であれば人間社会への影響という観点で、重大と思われるものが一つある。それは、世界の全海洋をめぐる深層循環の変化、それに伴う北大西洋周辺の気候の変化である。

ヨーロッパ諸国は、日本に比べ大変高緯度に位置している。（南欧スペインは東北地方と同じ、ロンドン、パリはサハラ中部と同緯度）にもかかわらず冬の寒さが厳しくないのは、北アメリカから北極海に向かう著しい暖流（ガルフ・ストリーム）の存在のお陰である。この暖流は、実は、世界の全海洋を結ぶ循環、ブローカー（Broecker）のコンベニア・ベルトと呼ばれる流れ（図1）の一部なのである。この海洋表層と深層を結ぶ循環の駆動源は、北大西洋の表層で水分の蒸発によって高塩分となった海水が北に運ばれ、高緯度のノルウェー近海で北極からの低温の空気に触れて強く冷却されて、その結果高塩分・低温の重い水となって、大規模な沈降を起こすことである。その後を埋めるように、表層では北大西洋を南から北へ向かう流れが維持されている。ところが、温暖化によってこの流れが著しく弱まる可能性がある事が、近年の研究によって示唆されたのである。

現在、地球フロンティア研究システムで地球温暖化研究領域長をしておられる真鍋淑郎博士は、地球温暖化研究のパイオニアであり世界の第一人者として広く知られているが、真鍋博士が数年前、アメリカの海洋・大気庁の地球流体研究所（GFDL/NOAA）に居られた頃発表された研究で、

\* 海洋科学技術センター  
地球フロンティア研究システム長



図1 ブロッカーの海洋大循環のコンベアーベルト

蒸発を盛んに行いつつ北大西洋へと北上した高塩分の浅層水は、広大な高緯度海域で冷却されて沈降し、冷温・高塩分の深層水として逆に南下する。それが喜望峰の南を東流して一部はインド洋へ北上し、残部は太平洋へ入って北上する。やがて上昇し、温暖な浅層水として大部分は逆行し、再び喜望峰の南方を西流し大西洋へ戻って北上する。こうして地球規模の大規模な海水のコンベアーベルトが形成される (Broecker, 1987, 1991, 1997による) (奈須, 2000より)

大気と海洋の大循環の相互作用をとり入れたコンピューター実験でそのような結果が得られ、大きな議論を呼んでいる。(図2) 温暖化によって中緯度の低気圧に伴う降雨量が増大し(高温ほど大気を含む水蒸気量は大きくなるから)、北大西洋の海水の塩分濃度が低下し、ノルウェー近海での沈降が著しく弱まったのである。その結果、北大西洋の暖流は弱まり、ヨーロッパ地域の温暖化は世界の他の地域に比べ、はるかに小さなものになる。実は、この海流が極めて不安定なもので、時折り消滅する(極端に弱くなる)のではないかと、という事は、今から約1万年前の水期の終了時における激しい気候のぶれ(一旦温暖化して後再び水期に近くなり、その後あらためて現在の間水期に遷移した)に関連して1980年代にブローカーが提唱し、真鍋博士の数値実験もそれを支持して話題になっていた。この際の突然の変化の原因は、氷期終了(北半球高緯度の夏の日射量増大)に伴う北米大陸上の氷床融解によって生じた湖からの淡水の流入とされる。さらにその後、グリーンランド氷床の掘削で得られた過去の雪の中の酸素同位体の詳細な分析から、過去数万年にわたる氷期には、1000年オーダーの温暖期が度々現われ、しかもその際の温暖化は数10年に5℃という急激なものであったらしいことが明らかにされた(図3)。このようないきさつから、温暖化に伴って大西洋の暖流が短期間に弱まる可能性は大いにあり得ることと思われるに至った。

そこで最近、この問題についての議論が盛んになったが、北大西洋の海流の突然の弱まりは起こらない、という考えやコンピューター実験も出て来た。海洋循環のモデルで水平面内の乱流拡散をどう取り扱うか、グリーンランドとアイスランドの間の海峡の浅瀬をきちんと表現できているか(格子間隔が狭い場合、ある程度の深さを持つ幅の狭い水路が失われ、重い水の流出がせき止められてしまう)といったモデルの小さな差によって結果が異なるらしいのである。それぞれのモデルでの結果は同一であるから、ロレンツのカオスとは同じではないが、その結果には北大

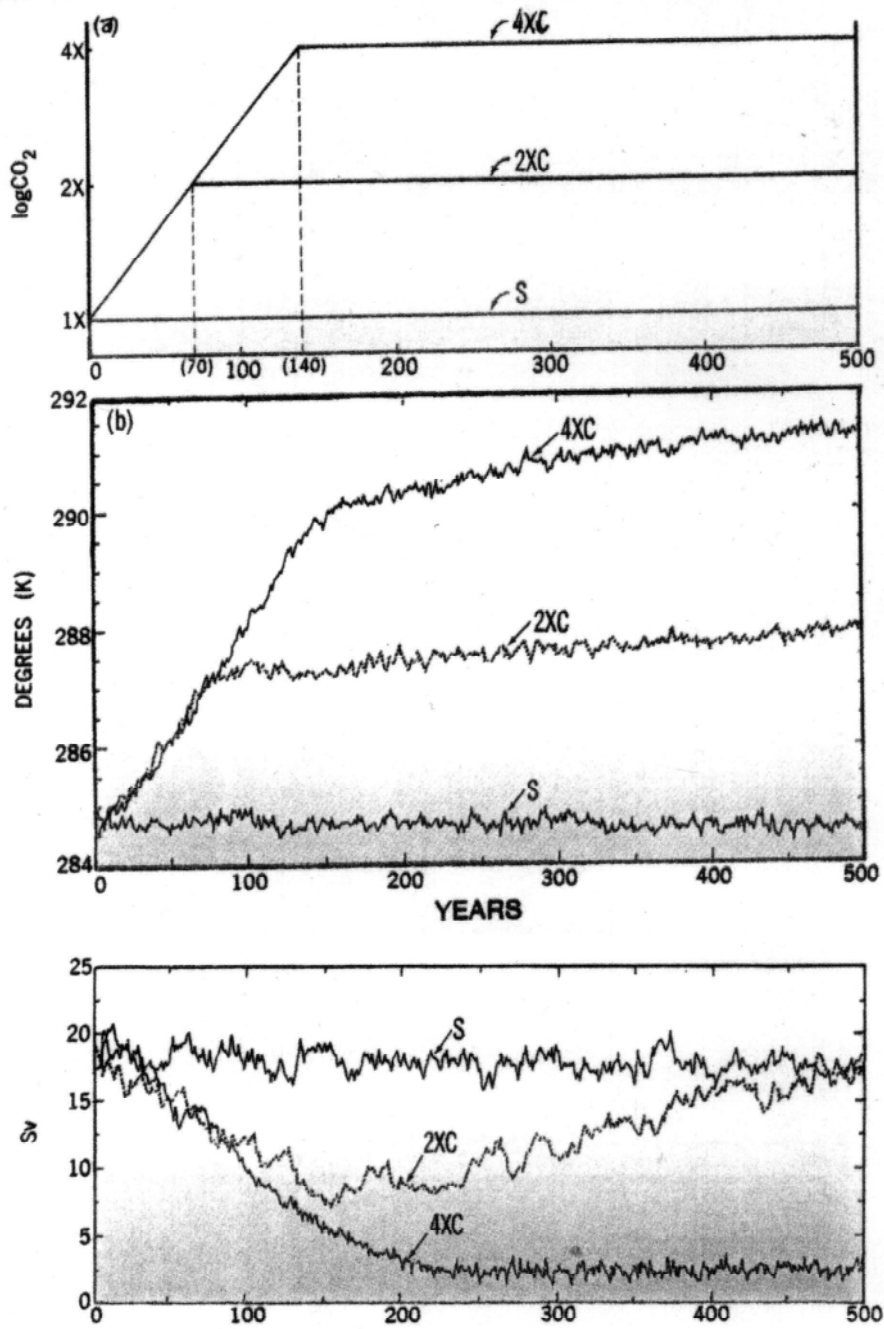


図2 CO<sub>2</sub>濃度2倍増及び4倍増の数値実験で得られた北大西洋深層循環の変化  
 上図(a)は仮定したCO<sub>2</sub>濃度の変化(対数)で、0年から年率1%で増加の後2倍(約70年)、4倍(約140年)に達した後は一定としてある。中図(b)は、それぞれに対応する全世界平均の地表気温の変遷、下図(c)は北大西洋深層循環の強さの変化。下図(c)で2×c(2倍ケース)は一旦弱まった後元の強さに戻るが、4×c(4倍ケース)では極端に弱い状態に遷移してしまう。下図の縦軸は深層へ沈降する海水のフラックスを10<sup>6</sup>m<sup>2</sup>/s(=1Sv)を単位として表す。(Manabe and Stoufer(1994)による)

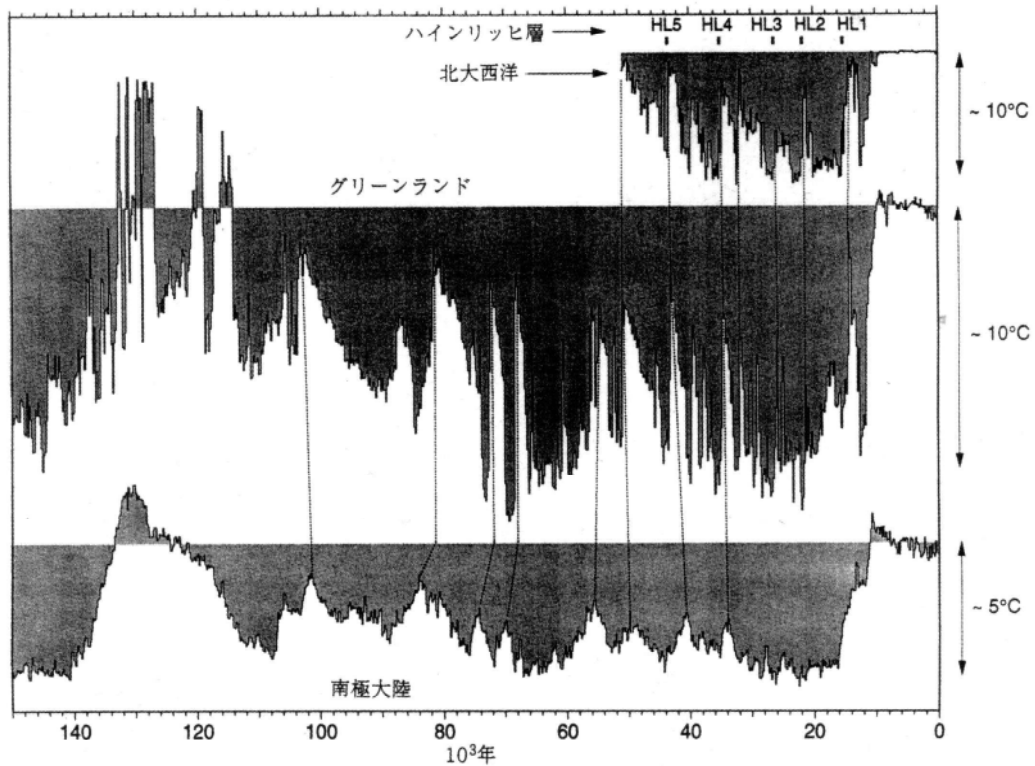


図3 グリーンランドと南極の氷床コア及び北大西洋の海底堆積物から推定された過去15年間  
の気候の変化

北大西洋とグリーンランドにおいて急速な変化を示している一方で、南極大陸においてはこれと対応した部分（細い破線の鉛直線で示されている）の変化の度合いが弱められていることを示している。温度の変化は、氷床中の同位元素の含有量（グリーンランドと南極大陸）、及び動物相の計算（北大西洋）から見積もられている。HL1～HL5は体積による「ハインリッヒ」層（Heinrich layer）を示す。図はJouzel et al. (1994) を基に作成した。（IPCC、1995より）

西洋の熱塩循環（温度と塩分による密度差で駆動される循環）は（少なくとも理想化すれば）、同一条件下で停止する状態もあるという、非線形システム特有の二重平衡解の存在（この事自体も議論的であるが）がある。

このようにして、花粉分析や氷床コアの同位体分析に基づく古環境の復元、海洋循環の力学理論、そして複雑なコンピューターモデルの設計に際しての考え方等が相互に関連し影響し合っ「温暖化予測に含まれるカオス」という科学として興味深く、社会へのインパクトとして重大な問題の研究が進行中である。

## 2. CO<sub>2</sub>の増加と全地球気温の上昇

大気中のCO<sub>2</sub>が赤外線遮へい作用によって地球表面を高温に保つ「温室効果」を持っているため、地質時代を通じての地球全体の寒暖の変化は大気中のCO<sub>2</sub>濃度の変化によってもたらされたのであろうという推論、および人間による化石燃料消費によるCO<sub>2</sub>放出のため気温が上昇する可能性があるという指摘は早く19世紀末からなされていた。第二次大戦後、各国の急速な産業発展によって、

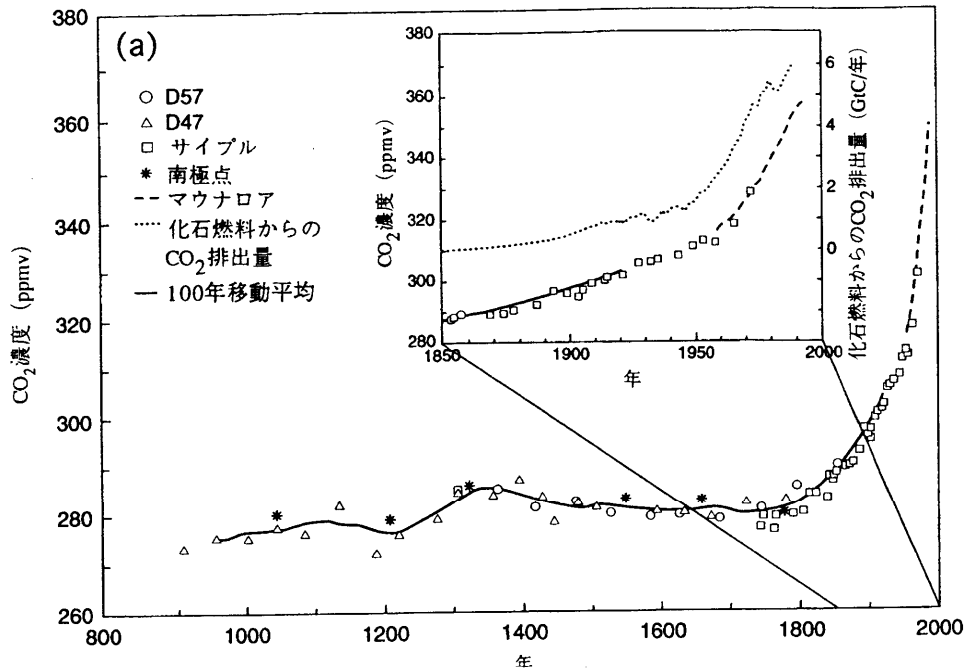


図4 過去1000年間のCO<sub>2</sub>濃度の変化

破線はマウナロアにおける直接観測、様々な形の点は南極やグリーンランドの水床中の気泡の分析から得られた値を示す。1850年以降の拡大図に記入されている点線は化石燃料からの放出量で右側のスケールによる。(IPCC、1994より)

この問題が将来実際に問題になる事が先進国研究者によって予見され、1957・58年の国際地球観測年(IGY)を機に、CO<sub>2</sub>濃度の定常観測がハワイ島と南極点において開始され、すぐに増加傾向が明らかにされた。図4は、このような直接観測に加え、南極氷床中に閉じ込められていた過去の空気の分析によって得られたデータも加えて過去1000年間のCO<sub>2</sub>濃度の変化を示したものである。図から読みとれるように、1700年代初めの産業革命以前には280ppm前後でほぼ一定であったCO<sub>2</sub>濃度が次第に増加し、特に近年の増加は指数関数的である。しかし、19世紀中からかなりの増加がみられており、過去の統計資料から、この原因は化石燃料燃焼より開拓のための森林破壊にあると考えられている。1990年には350ppmと自然状態に比べて25%も高濃度になっている。

このようにCO<sub>2</sub>(およびその他の温室効果ガス)濃度増加が相当のレベルに達しているので、地球温暖化は既に認められているのではないだろうか。地球全体の平均気温を算出するのはそれ程容易ではない。というのは長期にわたる気象観測点は陸上、それも先進国に偏在している。暑夏・冷夏といった自然に起こる気温の変動は幅が大きい上に地域による違いが大きいから本当の全地球平均を出すのが難しい。また、大都市での観測は、人工排熱その他の影響で100年で2℃以上の温暖化を示すが、これはあくまで局地的なものである。このような困難はあるものの、過去100年余りの全地球平均気温の変化が図5のように求められている。図から読みとれるように、年ごとの気温は大きく上下するが前後各2年を加えた5年間の平均は比較的なめらかな変化をしている。これを見ると、19世紀末から1930年代にかけて昇温傾向があったものが、1940年代をピーク

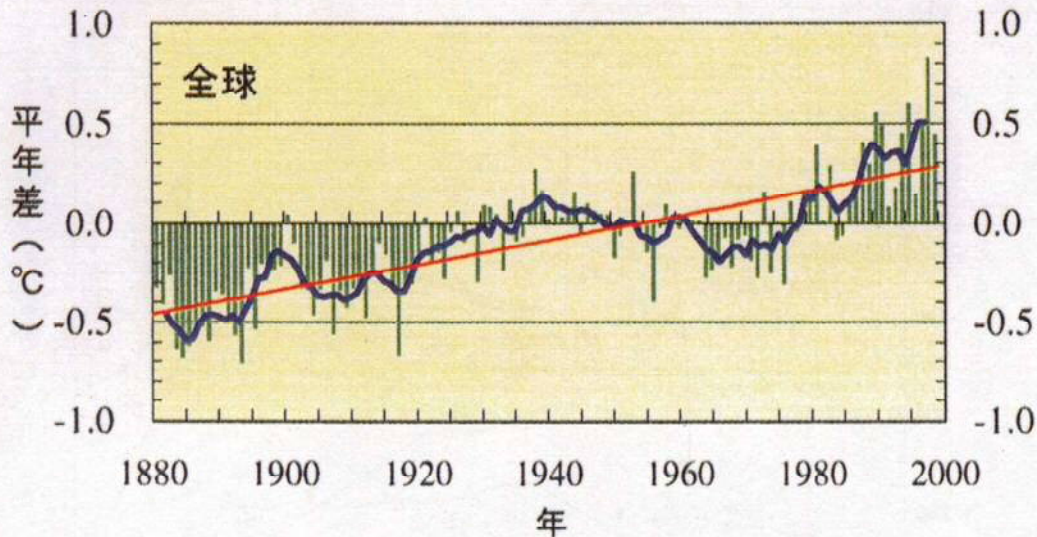


図5 過去120年余りの全地球平均地上気温の変化

細線は年平均気温の1年ごとの変化、太線は前後各2年を合わせた5年間の平均を示す。直線は全期間のトレンドを見やすく示したもの。(気象庁、地球温暖化監視レポート 1999より)

に下降に転じた。このような研究が行われるようになった1960年代には、この事実に驚き、何か未知の自然の変動機構によって気候は寒冷化に向かうとの予測が多く、気象庁より5年ごとに発行される異常気象報告の最初のもの（1974年）には、寒冷化の見通しが述べられている。この頃までに既に温暖化研究の基礎は固まっていたが、自然の変動によって寒冷化に向かうものなら人為的温暖化は、それを緩和するに過ぎないから社会への警告はなされなかった。1970年代後半に入ると、原因不明のまま自然の寒冷化はとまり、昇温傾向へと転じた。（現在では、10年を超える長期の気候変動のメカニズムについて、ある程度の見当がついて来ており、温暖化を相殺するほどの自然の寒冷化が起こることは考え難い。）1980年代に入ってこの傾向は著しくなり、過去100年の記録を塗りかえる高温が次々と現われるようになった。図5を大きな目で眺めて見ると、過去120年間に0.6°Cほどの昇温があったと考えられる。この大きさは、観測されたCO<sub>2</sub>その他の温室効果ガスの増加によるものとして説明可能な範囲にある。（5節参照）

### 3. 温室効果と温度上昇の予測

地球大気は「温室効果」をもつことが知られている。図6に示すように大気を構成する成分ガスのうちN<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>は赤外吸収を示さないが多原子分子であるH<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>Oなどは赤外・遠赤外域に強い吸収帯を持っている。他方、これらのガスは日射の大部分を占める可視光に対しては透明であるから（図6）、太陽から入射するエネルギーは大気層を素通りして地表面（海面を含む）に達し、そこで吸収されて熱エネルギーになる。熱せられた地表面は黒体として熱放射をするが、それは5100μmの遠赤外領域にあり、したがって大気中の「温室効果ガス」によって強く吸収され、

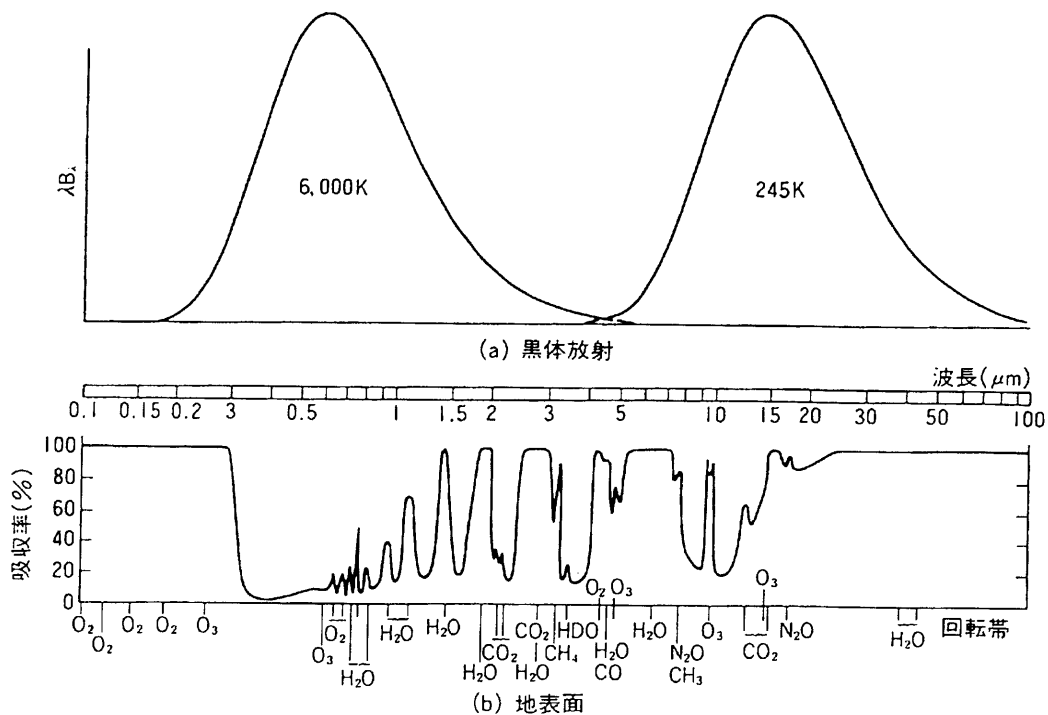


図6 (a)太陽(6,000K)および地球大気(245K)の温度での黒体放射スペクトル。(b)大気上端から地表までの全大気層による各波長の電磁波の吸収率。吸収にあずかる物質の名が記入してある。(c)大気上端から高さ11kmまでの大気(成層圏と中間圏)による吸収率。(b),(c)とも吸収物質(H<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub>など)の量として代表的な値をとった場合のもので実際には変動が大きい。波長による吸収率の変化は平滑化して示してある。(Goody, 1994)

直接宇宙空間へ流出することはできない。大気層中で吸収・放出を繰り返して密度のうすくなった対流圏上端あたりから最終的に空間に向け放散される。地表面から対流圏上端へ向けては赤外放射および対流の形でエネルギーが運ばれるが、それには地表の方が高温でなくてはならない。この有様を模式的に図3に示してある。このように、大気層がなかった場合に比べて地表気温は33℃も高温になっていると計算される。大気層の役割は温室のガラスに相当し、温室効果と呼ばれる。

大気は、H<sub>2</sub>Oを主とした各種のガスの温室効果によって現状の温度構造とエネルギーバランスを保っているのだから、そこに温室効果ガスが放出され、つけ加わると余分に赤外熱放射が遮られて地球の失うエネルギーが減少し、地球全体の温度が上昇するのは当然である。温度上昇によって熱放射が増加し、減少分を打ち消した所で新しい平衡状態が実現する。そのような異なる状態での温度を、赤外放射と対流によるエネルギーの鉛直輸送機構を取り入れた計算の最初のもは、真鍋淑郎博士によってなされた(Manabe and Wetherald, 1967)。図8にそれを示してあるが、CO<sub>2</sub>を現状の2倍にすると地表を含め対流圏全体で2.4℃温度が高くなる。ここまでの計算は、対流の効果に経験則を用いているものの、その信頼性は高いと考えてよい。ただし、2.4℃という値は、温暖化に伴い飽和水蒸気量が増加するので、海水からの蒸発によって大気中のH<sub>2</sub>Oが増加し、その

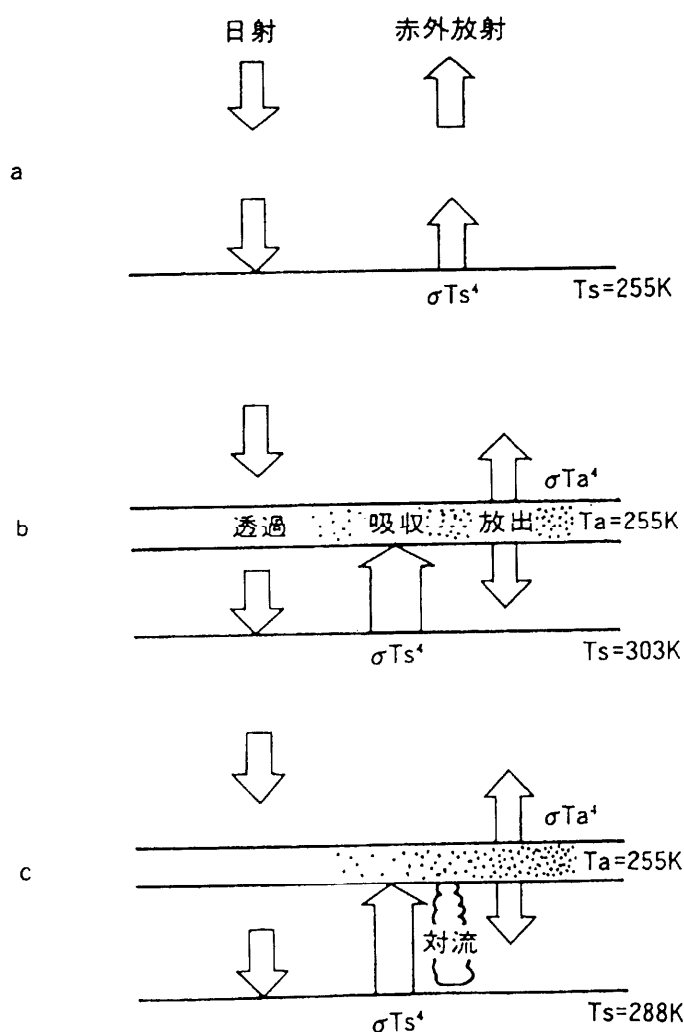


図7 温室効果模式図

a:大気層がない場合、b:大気層がある場合の放射平衡、c:放射に加え、対流による熱輸送がある場合の平衡。 $\sigma T^4$ は温度Tでの黒体熱放射。矢印の幅はエネルギー流束に比例するように描いてある。

温室効果によって昇温が拡大することも考慮してある。その際、相対湿度不変という仮定をおいているが、これには確たる根拠はない。高温化してもH<sub>2</sub>Oの絶対量は現状のまま（相対湿度は低下）という、極端な仮定で計算すると、昇温量は1.3℃となる。H<sub>2</sub>Oの増加という間接の効果（これは一般に気候変化のフィードバックと呼ばれるものの一つ）によって温度上昇は1.8倍にも拡大するのである。この部分は不確かさの一つと考えられているが、最近の対流効果を直接扱ったコンピューター実験の結果は、相対湿度不変の仮定は第一近似として適切なものであることを示している。

次節に述べる気候モデルを使った実験からは、地域的に異なる温度上昇を平均して先の単純な放射・対流平衡で求めたのとは異なる全地域平均の温度上昇が計算できる。この値は世界中の研



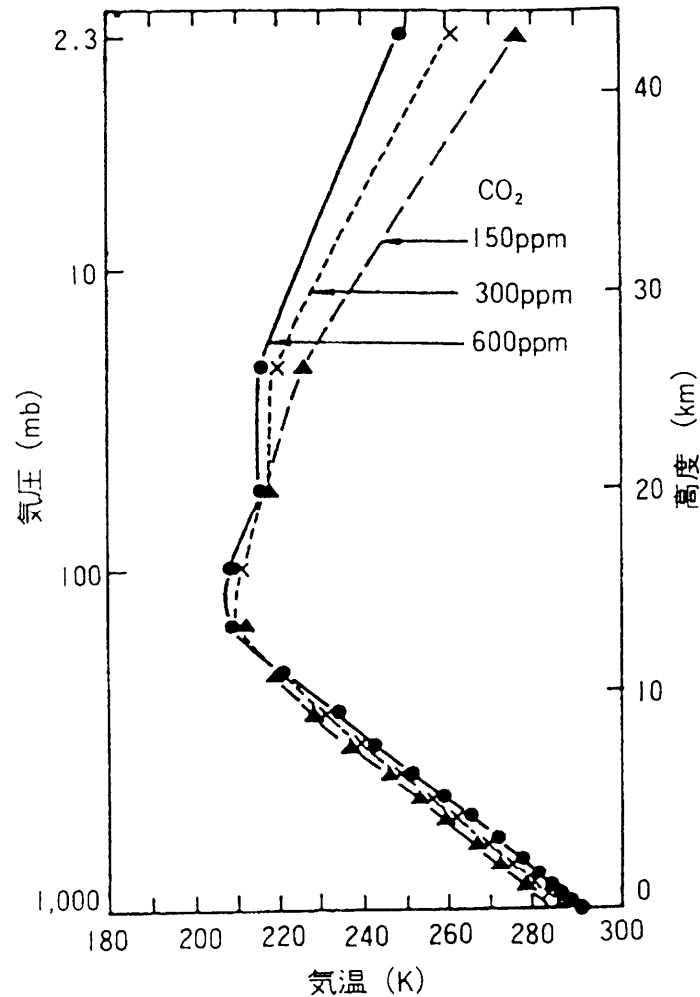


図8 放射・対流平衡にある大気温度の鉛直分布をCO<sub>2</sub>濃度が300ppm, 600ppm, 150ppmの場合について理論的に求めた結果 (Manabe and Wetherald, 1967)

究機関で多数行われた実験の結果、2℃～5℃という大きな範囲にばらついてしまった。その原因は、放射・対流平衡モデルにおける水蒸気増加の昇温拡大効果と同じような間接の効果（気候変化のフィードバック）がモデルによって大きく違うためである。この中で最も大きなばらつきの原因は雲の変化が放射に及ぼす影響（日射を反射する一方、地球から流出する赤外放射を減少させる）の違いである。雲は見てわかるように著しく変化に富んだ現象であるが、モデルでは雲の発生や雲量を250kmくらいの粗いメッシュでの温度・湿度の情報から計算しなければならない。さまざまな経験則によって計算方程式が作られているが、その妥当性は明らかではない。普通は現在の条件下で観測結果に合うようパラメーターを調整（チューニング）するため、CO<sub>2</sub>2倍という異なる条件下では大きな差が生まれてしまう。雲の効果を調べてみると、昇温を拡大する要因

と縮小する要因の大小が雲（特に高さ）によって違い、さらに高度による雲量の（温暖化に伴う）変化もモデルによってさまざまなので、トータルとしてのフィードバックの向きも決まらない。この雲の取り扱い、気候モデルによる温暖化予測の最大の難点と考えられている。

#### 4. 気候変化の推定

温室効果ガス増加の影響の大筋は先に記した鉛直一次元モデルで調べる事ができる。しかし、温度上昇の大きさは、緯度による日射の差や水蒸気量の差のため場所によって異なり、その結果、気圧分布や風、そして降水量の分布も今までと違ったものとなる可能性がある。地質時代の気候変動においても、全地球規模の高温・低温にともなって各地域の気候が変化したことが知られている。そこで単に地球全体の気温の上昇のみでなく、各地の気候がどう変わるかも興味ある問題である。これは、単に地球科学上の興味ばかりでなく、生活・産業への影響という点においても、地球全体の気温上昇より雨量減少による乾燥化のような各地域の気候変化が重大である。

地球上の気候の変化を推定するには、「気候モデル」を用いてコンピューター実験を行う。気候モデルとは、気候を支配する物理の法則をもとにして、地球上各地の気候がどのようになるかを頭ごなしに計算するもので、歴史的には天気予報のための大気モデルから発展して来た。現在の天気予報は、全世界の気象観測データをもとにし、全地球大気をメッシュに切り、各メッシュ点で気圧、風、温度、湿度の変化を支配する物理の方程式（質量保存則、運動方程式、エネルギー方程式、水蒸気変化の式）を適用して、これらの時間変化を追いかけ、1～7日後までの気圧配置や風、気温、降雨を計算することによって行われている。このためのコンピューターモデルを使って、さらに長く何ヶ月も何年も計算を続けると天気予報としては役立たないが、南北の日射の差や海陸の熱容量の違いが組み込まれていれば、例えば冬季の東アジアではシベリアに寒気がたまって高気圧を作り、それが北西季節風となって日本に吹きつけ日本海側に多雪をもたらす、といった気候状態をシミュレートすることができる。この際、海洋の水温の海水の分布、大陸上の土壌水分なども変数として計算し、それらが気候に与える影響を取り入れるようにする。

このように気候をいわばトップダウンで計算することができるので、同じモデルで大気中のCO<sub>2</sub>濃度を2倍にして計算すれば、その状態での気候がわかるというわけである。このようにして得られたCO<sub>2</sub>倍増気候と、同じモデルで計算した現在の気候（実際と一致はしないが大筋は再現できる）との差をとって気候の変化を推定する。このようにして推定した気候の変化は、残念ながら今のところ余り信頼できるものではない。気候モデルで用いるメッシュの間隔は100～500kmであるが、雲や雨はそれよりスケールの小さな現象である。対流雲（入道雲）は、熱帯・亜熱帯を中心に降雨をもたらす重要な現象であるが、その生成や構造を直接方程式に従って計算することはできない。メッシュ点で計算された温度・湿度・上昇流速などから経験的に妥当な物理的仮定をもとに計算するという方法（パラメタリゼーションと呼ぶ）をとらざるを得ない。この方法はモデル作成者の判断によるから沢山のモデルで結果のバラツキを生じる。

以上のような困難はあるものの多くのモデルの結果や、物理的メカニズムからみて妥当と思われる変化は次の通りである。（CO<sub>2</sub>2倍実験）

- (1) 温度上昇は低緯度より高緯度で大きく、また、秋から冬にかけて大きい。極域の冬の温度上昇は10℃近いであろう。
- (2) 降水量は、現在の多雨帯である赤道域と高緯度で増加の傾向にあり、中間の亜熱帯・中緯度

では変化が小さいか、やや減少の傾向にある。

(3) 気温の上昇とともに蒸発量はどこでも増えるので、降水量との差の結果としてもともと半乾燥地である亜熱帯から中緯度において乾燥地域が拡大する可能性がある。

(4) 温度上昇に伴って雨の降り方が熱帯的となり、日本を含む中緯度・亜熱帯では集中して降る対流性降雨が増す。

(5) 経度方向の違い、大陸スケールの気候変化では信頼できる変化は僅かである。即ち南ヨーロッパ・北アメリカのかなりの部分では、夏季土壌が乾燥する可能性がある。一方、東アジアのモンスーン域では夏の雨量が増加し湿潤化の傾向にある。

一例として、最近地球フロンティア研究システムで行われた数値実験の結果を図9に示す。

以上の程度なので、関心の深い日本の気候の変化についてはほとんどわからない。間違いない点としては、冬季高緯度の温度上昇が著しいのでシベリア寒気の吹き出しは弱まるであろう。日本海側の雪は、温暖化により雪から雨に変わる地帯のほかは、水蒸気量の増加に応じて積雪が増えるかもしれない。梅雨の時期がどうなるのか、雨量はどう変わるかは夏期の水資源に重大な影響を与えるが、それについては不明な点が多い。台風の発生・強さの変化も予測が難しい。一般に熱帯域の高温化は台風を強める方向になると考えられるが、それとて周囲の海水温との関係で変わる。最近、気象研究所の杉氏らによって行われた数値実験によると、CO<sub>2</sub>2倍時に相当する海

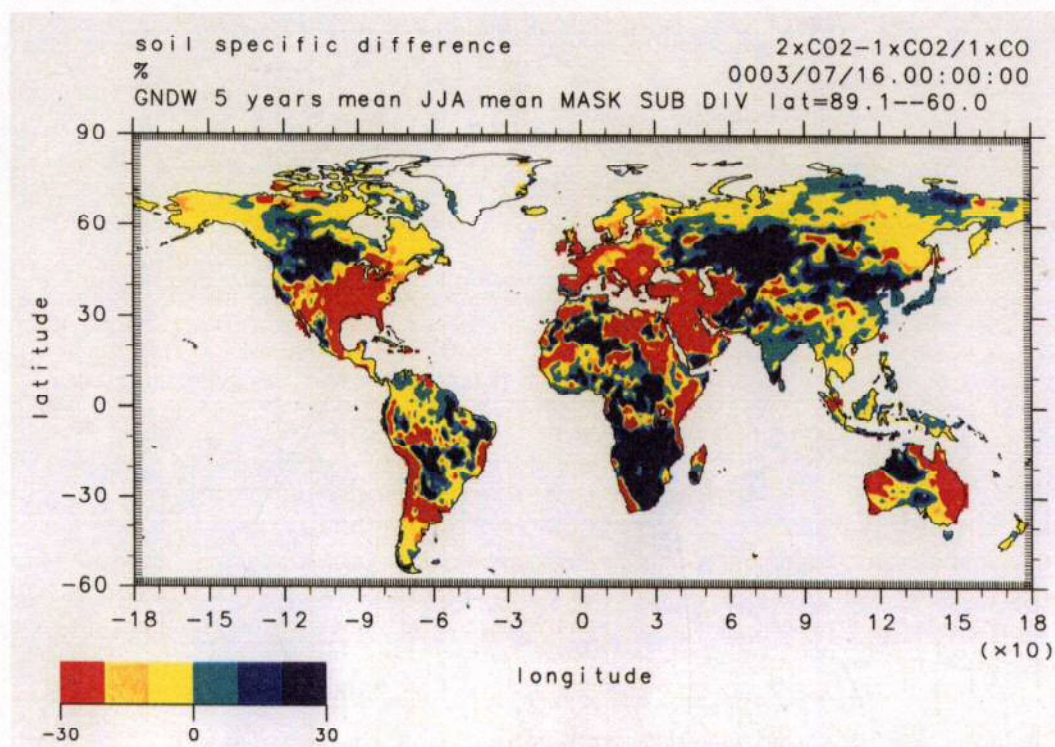


図9 CO<sub>2</sub>2倍時と現在の土壌水分量の差

暖色は減少(乾燥化)、寒色は増加(湿潤化)を示す。東京大気気候システム研究センターと国立環境研の共同で開発されたモデルをもとに解像度を上げて(水平メッシュサイズ約100km)行った実験による。(阿部による)

海面水温分布の場合、台風（風速がある値以上の熱帯低気圧）の数は、現在より20%ぐらい減少する。図10の上図は1979-88年の10年間の台風（およびハリケーン、サイクロン）の経路、中図は10年間の海面水温分布を与えてモデルで計算された台風の経路（両者の数がほぼ同じになるようモデルでの台風の基準を定める）、下図は温暖化実験で得られたCO<sub>2</sub>2倍の海面水温分布のもとに、同じモデルで計算された台風経路の分布である。総数で20%以上減少し、特に西太平洋の台風の減少が著しい。しかし、降雨量（台風に伴う）は増加の傾向にあるなど、今後検討すべき多くの問題が残っている。

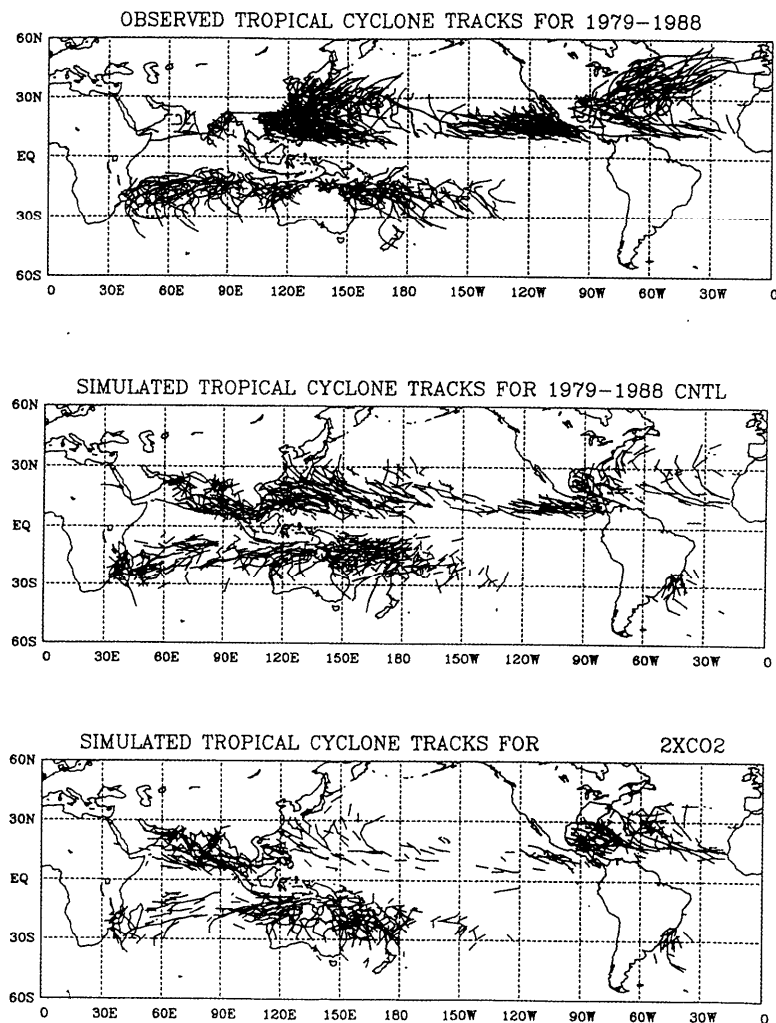


図10 CO<sub>2</sub>増加に伴う台風（強い熱帯低気圧）の変化についての数値実験の結果

上図は1979～88年の10年間に観測された強い熱帯低気圧の経路。中図はそのシミュレーションで、10年間の海面水温を与えて（現状のCO<sub>2</sub>濃度の下で）大気モデルを10年間走らせたときモデルに現われた強い熱帯低気圧の経路。下図は、CO<sub>2</sub>2倍時の海面水温分布を与え（CO<sub>2</sub>濃度も2倍）、同じように実験した時のもの。CO<sub>2</sub>2倍条件下で、台風の数が著しく減少している。

（気象研究所、杉氏による）

## 5. 海洋による温暖化の遅れ、エアロゾルの効果

これまでの温度上昇及び気候変化の推定は、すべて平衡状態を仮定していた。「CO<sub>2</sub>が2倍になった時の温度上昇は、気候は…」という表現は正しくない。「CO<sub>2</sub>が2倍であるもうひとつの地球（惑星）の温度は何度で気候はどのようか」という質問への答えを求めていたのである。現実にはCO<sub>2</sub>濃度は年とともに徐々に増えていき、それに応じて気候も徐々に変わって行く。そのため、CO<sub>2</sub>濃度が自然状態の2倍になった時点での温度や気候の変化は、巨大な熱容量を持つ海のために平衡より遅れ、3節・5節に記したようにはなっていない。実際に必要とされるのは、この遅れの効果も考慮して、例えば30年後の気候はどのようになっているか、という予測である。このような予測をするには、当然のことながら海洋結合モデルを用いてコンピューター実験を行う。このためには海洋を3次元的にメッシュに切り、海洋循環を駆動する海水の密度差を温度と塩分濃度から求め、運動方程式に従って海水の運動を計算する。温度と塩分濃度は大気との間の熱交換、降水と蒸発によって変わるから、また、風によって海面近くの海水が動かされ黒潮のような海流を生じるから、刻々変わる大気と海洋の状態を相互作用をとり入れて計算しなければならない。このためにはスーパーコンピューターを2,000時間ぐらい使わなければならない。IPCCの1990年の報告の時には、前述の真鍋博士のグループによるものしかなかった。其後、温暖化問題の重要性から日本の気象庁・気象研究所を含め、世界中で数カ所の研究センターで実験が行われた。その結果の全地球平均温度の上昇を図11に示す。この計算では簡単のため、全温暖効果ガスの増加率をCO<sub>2</sub>に換算し、

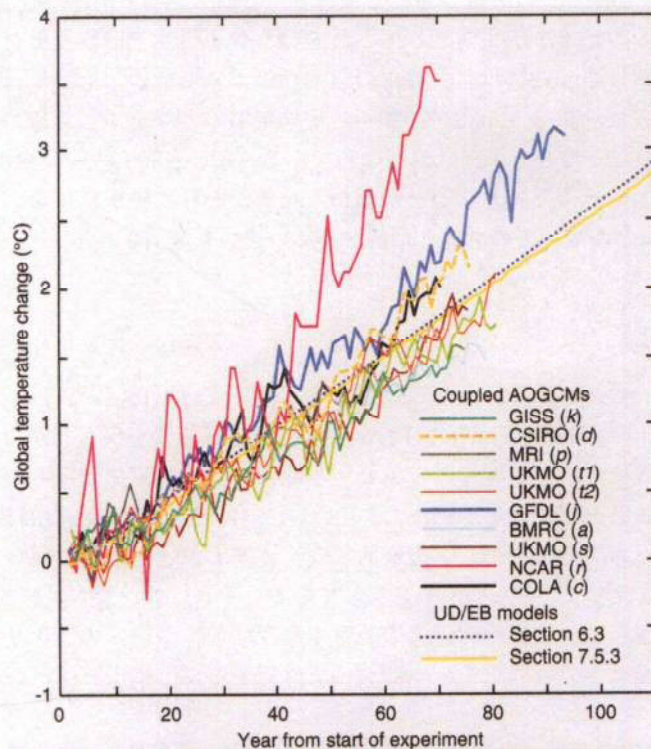


図11 大気海洋結合モデルでCO<sub>2</sub>を徐々に(年率1%)増加させたコンピューター実験での全地球平均気温の変化。世界中の研究機関での結果。(IPCC 1995による)

年率1%と仮定してある。するとCO<sub>2</sub>濃度が2倍になるのは約70年後であるから、その時点での温度上昇は1.8℃程度になり、平衡昇温（多くは2.5℃～3℃）の60～70%のとどまっている。したがってIPCC1990では、何も対策を講じなかった場合、全温室効果ガスの効果がCO<sub>2</sub>2倍相当となる時点（2040年頃）までの昇温は、今から約1℃と見積もられる。

ところで図10の計算をした大気・海洋結合モデルで、産業革命以降これまでの実際に起こった温室効果ガス濃度の増加（CO<sub>2</sub>については図4）を与える気温上昇を計算し、この上昇曲線の中で現在に相当する所の昇温がどうなっているかチェックできる。（ちなみに、現時点での全温室効果ガスの赤外線遮へい効果（放射強制力で2.5Wm<sup>-2</sup>）は、たまたまCO<sub>2</sub>2倍時の半分となっている。）そこで、それに相当する所の昇温をみると0.8～0.9℃となり、これは過去100年余の昇温約0.6℃に比べて大き過ぎる。今までの議論から理解されるように、モデルに含まれる多くの不確定要因を考えると、この差は必ずしも問題にすべきものとは言えないかもしれない。

ところが、最近、これまで考えていなかった要因で無視できない大きさのものがみつかった。それは、石油・石炭の燃焼に伴って発生する亜硫酸ガスがもとになって生じる硫酸エアロゾル（0.1μm程度の微粒子）である。現在はかなり改善されたが1970年頃、工業地帯ではスモッグになやまされた事を記憶されているであろう。このエアロゾルは日射を散乱、反射し、地球を冷やす効果を持つ。これはCO<sub>2</sub>の主要発生源である化石燃料燃焼に結びついているから温室効果と同時に考えられるべきものである。その冷却効果は発生源である北半球の大陸上に限られているが、最も大きいヨーロッパではCO<sub>2</sub>の効果と比肩するほど（打消すほど）であり、全地球平均にすると全温室効果ガスの効果を20～25%ほど減少させる大きさ（放射強制力-0.5～-0.7Wm<sup>-2</sup>）を持つとされている。エアロゾルの効果を示す例として、英国ハドレー気候予測研究センターで行われたコンピューター実験の結果を図12に示す。将来の温室効果ガス増加のシナリオ（特に規制を行わなかったケース）に従った計算で、2030～2050年の平均気温の上昇を示したものである。上図は温室効果ガスのみを考慮した場合、中図は両者の差である（IPCC1995より）。全域で1℃程度昇温が減り、特に北半球の工業地帯で顕著なことがわかる。まだそれ程確かではないが、ともかく、この効果を考えると先ほどの現状での計算と観測とのくい違いも解消される。

## 6. CO<sub>2</sub>濃度の安定化

1992年リオデジャネイロで開かれた「地球サミット」で調印された「気候変動枠組み条約（FCCC）」（通称温暖化防止条約）は、その目的を社会の持続可能性を保ちながら（生産活動を続けながら）気候システムに危険な影響を及ぼさない程度に大気中の温室効果ガスの濃度を“安定化させる（Stabilize）”こととしている。そこで、IPCC 1994、95では長期的な展望に立ってCO<sub>2</sub>（その他の室温効果ガス）の排出を抑制し、最終的に安定化する（一定濃度に保つ）には、将来の放出量をどのようにしなければならないかを計算している。それには、まず最終的なCO<sub>2</sub>濃度のレベルをいくつか選び、さらに、そこへ向けての大気中濃度増加についてのシナリオを作り、それをもとに海洋や陸上生態系への吸収をモデルによって計算することによって、シナリオに沿うような放出量を逆算するのである。

仮定されたCO<sub>2</sub>濃度安定化への時間経過と、それに対応する放出量を、それぞれ図13、図14に示す。図には、同じ安定化レベルに対して、それに至るCO<sub>2</sub>濃度の時間経過に二通り（実線と破線）のシナリオを仮定した結果が示してある。これからわかるように、例えばCO<sub>2</sub>濃度安定化レベルを

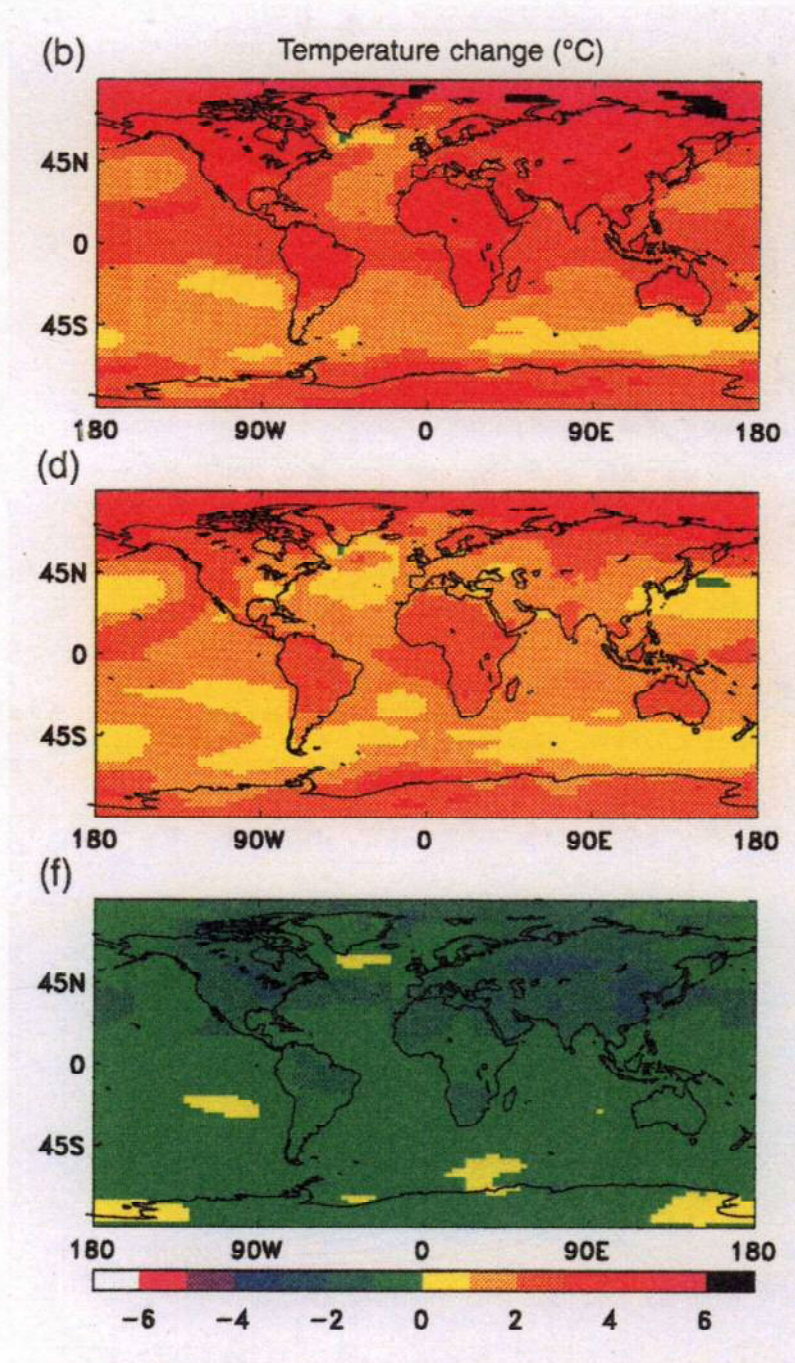


図12 特に規制を行わなかった場合の温室効果ガス増加シナリオのもとで計算した2030～2050年の年平均気温の変化(°C)  
 (b)温室効果ガスのみに対する気温の応答。(d)エアロゾルとCO<sub>2</sub>の強制力の組み合わせに対する気温の応答。(f)エアロゾルの強制力に対する気温の応答((d)-(b))。Mitchell *et al.* (1995b) による。(IPCC 1955より)

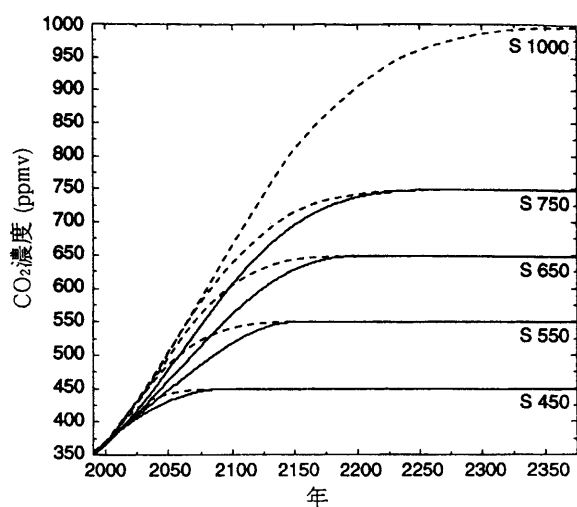


図13 許容排出量を求めるために用いた濃度安定化曲線

S450～S750はそれぞれ450～750ppmにCO<sub>2</sub>濃度を安定化させる場合の濃度変化シナリオで、実線はIPCC 1994で想定したもの。破線はWigley et al. (1995)によるもので、よりゆっくりとした安定化が行われる。比較のため、1000ppmvでの安定化曲線も示した (S1000)。(IPCC 1995より)

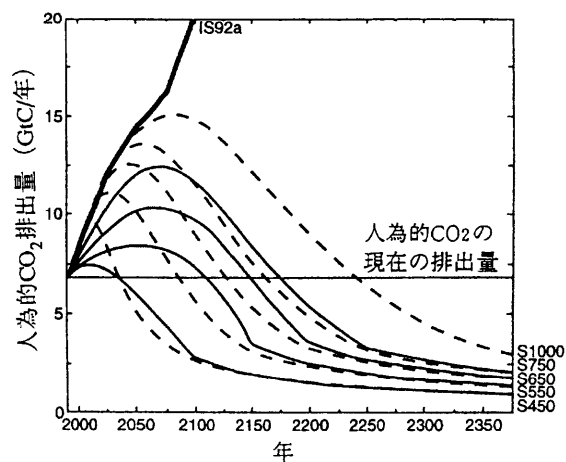


図14 図13の安定化曲線に対応する人為的排出量の見通し

450～750ppmvで安定化する経路は図13に示した。1000ppmvでの安定化(これも図13から)に対する排出量も比較のため示した。(IPCC 1995より)



自然状態の2倍(550ppm)とした時、ゆっくりそれに近づくなら(実線)当面100年くらいは現状かそれをやや上回る放出量があってもよいが、その後大幅に放出を減らして、最終的には現在の1/4程度(1.7Gt/年)まで減らさねばならない。もし、今すぐの放出削減が無理で、当面は人口増・経済発展に見合う放出量増加(図14のIS92aで示される線)を許し、前の例より速くCO<sub>2</sub>濃度が上昇するのを止むを得ないとすれば、図14の破線が示すように、50年後くらいまではかなり大きく(現在の2倍近くまで)放出量が増加してよいが、その後で前の場合より急速に(わずか50年後に)ドラスティックな放出削減をしなければならない。このようなシナリオによる違いにより、当面の排出削減に違いを生じ、そのどちらが適当かが議論されているが(Wigleyほか、1996;佐和隆光 1997)、安定化までの全放出量は、安定化レベルが同じなら余り違いがない。

## 7. 計画(管理)温暖化に向けて

現在、「地球温暖化問題」と言えば温暖化という困った事態を如何に回避するか、という問題であり、1992年にリオデジャネイロで結ばれた「気候変動枠組み条約(FCCC)」はしばしば「温暖化防止条約」と呼ばれている。しかしこれまで説明して来たように、温暖化は既に起こっており、これから温室効果ガスの放出を低いレベルに抑えられたとしても、相当程度の温暖化と気候の変化は避けられないと思われる。6節に記したように枠組み条約の目的は、危険とならないレベルに室温効果ガスの濃度(したがって温暖化と気候変化)を「安定化」させることであり、それに向けてのシナリオが検討され始めている。他方、現在はまだ最終的な安定化(例えばCO<sub>2</sub>2倍)の「目標」決め得てはいないが、当面の第一歩としてCO<sub>2</sub>放出削減に向けた京都議定書が作られ、その発効が待たれている。それ(日本の場合、2010年に1990年の状態より6%減)を実現するには相当の努力が要ると思われるものの、実現のための具体策作りが着々と進行している。この第一歩が成功すれば、最終的に安定化に向けた努力が世界中で行われることになる。

温室効果ガス濃度の将来の変化についてシナリオが与えられれば、気候モデルによって対応する気候変化の予測が可能である。その予測が十分に信頼できるものであれば、気候変化は、さほど困難をもたらすものとは思われない。50年、100年という時間の間には住宅など生活の基礎も、農業・林業の形態も、産業立地にかかわる水資源供給その他のインフラストラクチャーも、気候変化に対応して少しずつ変えて行くことができる。すなわち温暖化と気候変化に人間社会が適応して行けばよい。一般に温暖気候の方が自然の生産力は豊かであるから(事実、6,000年前の温暖期は気候最適期—Climatic optimum—と呼ばれ、シベリアでは森林が広がっていたし、日本の縄文時代が自然の恵み豊かであったことは最近、次々と明らかにされて来ている)、上手に適応すれば、プラスの影響の方を多くできるかも知れない。一口で言えば「温暖化防止」ではなくて、「計画(管理)温暖化」という考え方が必要であろう。

そのための必要条件は気候変化予測を間違いのないものにする事である。コンピューターによる数値実験は科学の課題であるとともに人類社会にとって欠く事のできないものとなって行くであろう。それが実現するための二つの鍵は、シンポジウムの二つのテーマ「人文・社会科学と自然科学の協力・融合」を実現すること、そして気候システムが決定的な「カオス」を含まない予測可能なシステムである事、にかかっている。