

地球環境特集 特集記事1

地球温暖化の科学

松野太郎 北海道大学大学院地球環境科学研究科 教授
Taroh Matsuno

Scientific Basis of “Global Warming”

1 はじめに

過去10年ばかりの間に、それまでの東西冷戦と核戦争の脅威の陰にかくれていたさまざまな「地球規模問題」が姿を顕わにして来たが、「地球環境問題」もそのひとつである。1985年南極上空で春季のオゾン量が異常に少なくなる事が日・英の研究者によって見出され、米国の人工衛星データで、考えられない故に誤差として無視されていた値が実は正しいことがわかって、それまで10年間大気化学者によって予測されていた「フロンによる成層圏オゾンの減少」が南極オゾンホールという劇的な形で現実に姿を現した。それまで世界の研究者からの警告に少しずつ動き始めていた国際政治の流れは一挙に加速し、1985年に結ばれたオゾン層保護の枠組み条約の中身として、1987年にフロンの製造を半減することを決めたモントリオール議定書が作られた。

翌1988年は世界的に高温の年であったが、特に北米では猛暑に加え50年ぶりの干魃に見舞われた。その頃既に専門研究者から温室効果ガスによる「地球温暖化」の可能性が社会に向けて警告されていたので、「地球温暖化が始まったのではないか？」という質問が米国議会で発せられ、NASAのHansen博士はこれに肯定的に答えて、地球温暖化は地球科学の研究課題から一挙に社会問題・国際政治の問題となったのである。

地球環境問題の大きな特色は、問題とする被害（悪影響）と原因との関係が直接的でなく、また、時間的にも今の問題でないため、原因と結果の論理的・時間的へだたりを地球科学的知識によって結びつけ、推定せねばならない事であろう。かつての地域的汚染による公害は、被害が現に起こっており、また、原因と結果の関係も分かり易いものであった。これに対して、現在の地球環境問題においては、現在何も困った事が起こっていないにもかかわらず、地球科学者の描く未来像に対して脅威を感じ、それを防ぐため現在行動を起こすことが求められているのである。

しかしながら、自然の地球そのものの変化は、実験室中の現象のように単純でよくコントロールされた変化では

なく、多くの要因が絡み合い、因果の連鎖の結果として起こるものであって、将来予測には大きな不確定を残している。このため、アメリカ共和党の議員の中には、地球温暖化はレベルの低い科学者が作り出した絵空事であると主張する人が少なくないと聞く。生活と経済に重大な影響を与えるCO₂の排出抑制に踏み切るのに、根拠が不確かでは困る、というのはわかるが、かと言って対応策が手遅れになっては取り返しがつかない。この問題についての現在の科学的知識と、含まれている不確かさがどのようなものであるか、少しでも正しく理解して頂きたいと思う。

前述の1988年の北米の猛暑の年に国連によって設けられた「気候変動に関する政府間パネル（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）」は、世界中の関連研究者を集結して、この問題に関する科学的知見の総まとめとそれにもとづく将来予測を行い、1990年に報告した（IPCC,1990）。其後、新しい研究結果とその整理に立った部分的報告が1994年に出され（IPCC, 1994）、昨年第2回目の全面的改訂版（IPCC,1995）が出された。これらの報告書に沿って地球温暖化の機構についての現在の理解の概略と、未解明の問題点を以下に説明したい。

2 CO₂の増加と全地球気温の上昇

大気中のCO₂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CO₂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CO₂放出のため気温が上昇する可能性の指摘は早く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、この問題が将来の大きな問題になる事が先進的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、CO₂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1は、このような直接観測に加え、近年行われた南極氷床中に閉じ込められていた過去の空気の分析に

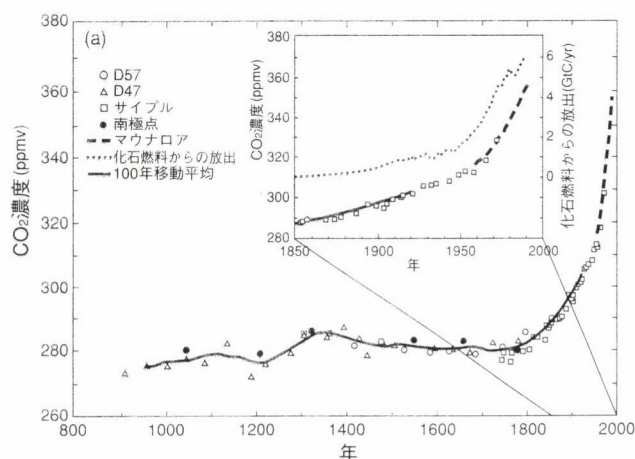


図1 過去1000年間のCO₂濃度の変化。破線はマウナロアにおける直接観測、様々な形の点は南極やグリーンランドの水床中の気泡の分析から得られた値を示す。1850年以降の拡大図に記入されている点線は化石燃料からの放出量で右側のスケールによる。(IPCC 1994より)

よって得られたデータも加えて過去1000年間のCO₂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CO₂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事がわかる。

このようにCO₂(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2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、気象庁により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

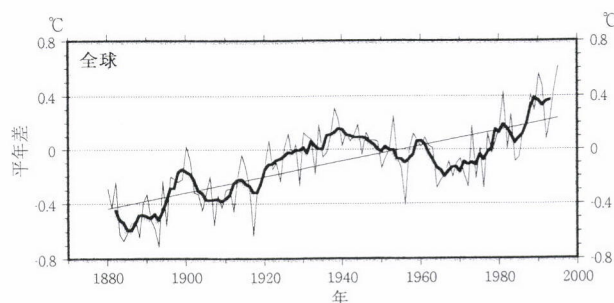


図2 過去110年余りの全地球平均地上気温の変化。細線は年平均気温の1年ごとの変化、太線は前後各2年を合わせた5年間の平均を示す。直線は全期間のトレンドを見やすく示したもの。(気象庁、地球温暖化監視レポート 1995より)

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。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2を大きな目で眺めて見ると、過去110年間に0.5～0.6℃の昇温があったと考えられる。この大きさは、観測されたCO₂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。

3 温室効果とは

地球大気は温暖効果をもつことが知られている。大気を構成する成分ガスのうちN₂、O₂は赤外吸収を示さないが多原子分子であるH₂O、CO₂、CH₄、N₂O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、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5～100 μm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、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温度傾度がなくてはならない。現実の大気では、対流によるエネルギー輸送が卓越し、温度傾度はそれによって決められている。この有様を模式的に図3に示してある。このように、大気層がない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、H₂O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が、そこに余分の温室効果ガスが放出され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。温度上昇によって熱放射が増加し、減少分

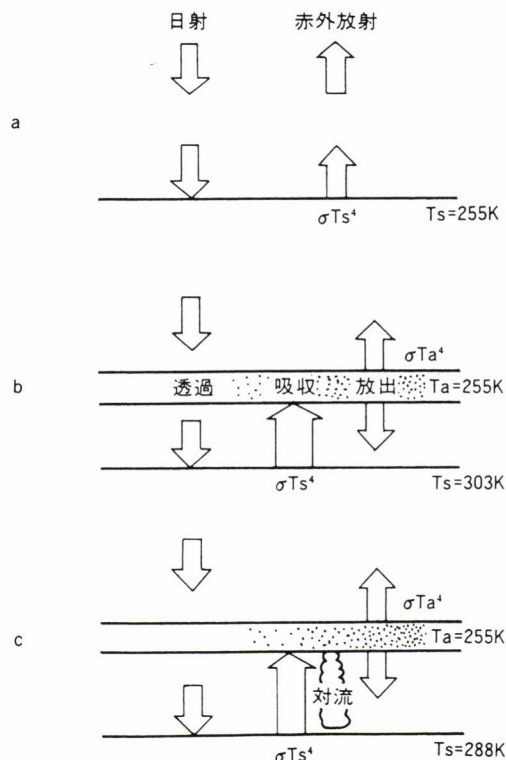


図3 温室効果の模式図。a:大気層がない場合、b:大気層がある場合の放射平衡、c:放射に加え、対流による熱輸送がある場合の平衡。 σT^4 は温度Tでの黒体熱放射。矢印の幅はエネルギー流束に比例するように描いてある。(第24回白石記念講座 (1993年))

を打ち消した所で新しい平衡状態が実現する。温室効果ガスを増加させて放射バランスがくずれた時の非平衡の大きさを「放射強制力」と呼んでいる。例えばCO₂を自然状態から2倍に増加させたときの放射強制力 (ΔQ) は4.4W/m²と見積もられている。現在地球に吸収される日射とそれに平衡する大気上端からの赤外放射は約250W/m²であるから、その2%に近い非平衡が生じるわけである。このような非平衡が生じると、地球全体が昇温し新しい平衡に向かう。その状態での温度を、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て計算した最初のもは、日本出身で米国・海洋大気庁の地球流体研究所 (GFDL/NOAA) で研究を続けているCO₂問題のパイオニア、真鍋淑郎博士によってなされた (Manabe and Wetherald, 1967)。図4にそれを示してあるが、CO₂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H₂Oが増加し、その温室効果によって昇温が拡大することもある。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H₂O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。H₂O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

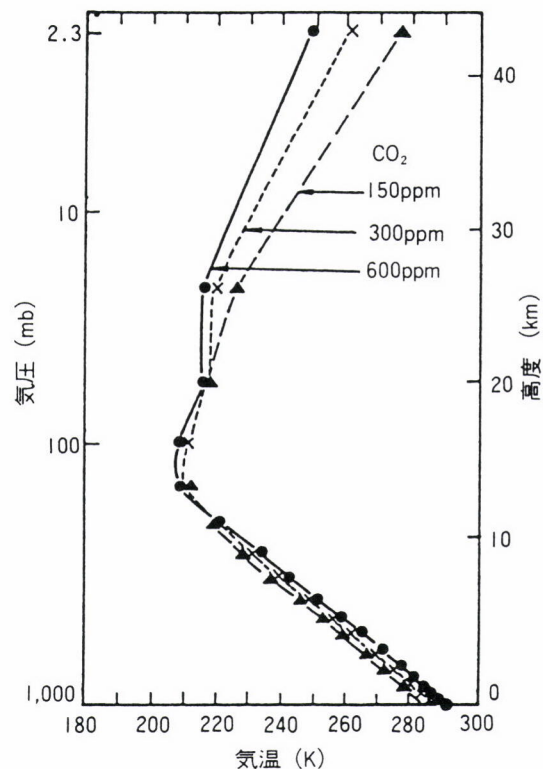


図4 放射・対流平衡にある大気温度の鉛直分布をCO₂濃度が300ppm, 600ppm, 150ppmの場合について理論的に求めた結果 (Manabe and Wetherald, 1967) (第24回白石記念講座 (1993年))

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。

4 温室効果ガス増加の予測 — 炭素循環の問題点

現在の温暖化問題が19世紀以来の古典的CO₂問題 (1970年代まで) と大きく違うところは、CO₂以外の温室効果ガスが人為起源で増加していること、その効果を積算するとCO₂増加に比肩し得るほどであることが認識されている点である。大気中にはCH₄、N₂Oといった微量ガスが1ppm前後の濃度で存在しているが、それらはCO₂に比べて100分の1以下にもかかわらず赤外吸収能が数十倍も強く、かつ強度が飽和から遠い為、濃度増加による温室効果増加が相対的に大きくCO₂増加の効果に比べて10%のけたの大きさを持つ。また、人工物質であるフロン (クロロフルオロカーボン類、CFCl₃、CF₂Cl₂その他) はオゾン層破壊物質として知られているが、同時に極めて強い赤外吸収を示し、濃度が1ppbとCO₂の10万分の1であるにもかかわらず、やはりCO₂の10%のけたの温室効果増加をもたらす。図5は、産業革命後のこれらガスの増加による放射強制力 (赤外線遮へい量) を成分別に調べ加算したものである。(CH₄、N₂Oは氷床の

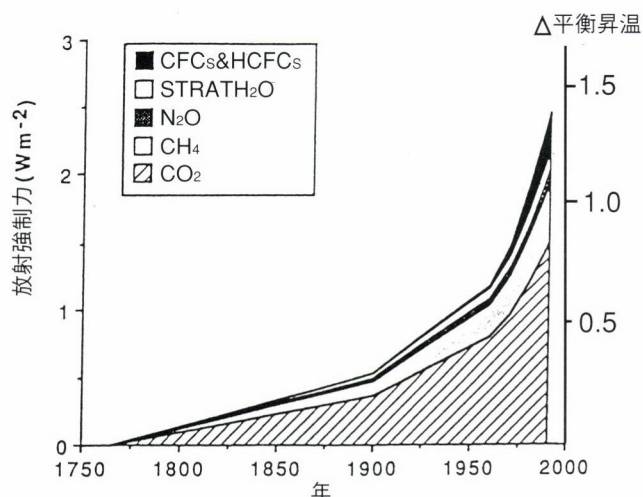


図5 これまでの人間活動起源の各種温室効果ガスによる放射強制力。各ガスの寄与の積算。グラフの各ガス別の大きさは左上の囲み中に上下に記した順に積み上げてある。右側スケールは、CO₂2倍の平衡状態での温度上昇を2.5℃とした場合の各時点での放射強制力に対応する平衡温度上昇。(IPCC 1994より)

気泡の分析、フロンは実測による。) 図から読みとれるように、CO₂以外のガスの効果の合計はCO₂に近く、特にこの30年ほど顕著になっている。CH₄、N₂Oの増加の原因は水田、家畜の増加、窒素肥料などに求められているが、その詳細にはまだ不明な点が残されている。

このようにCO₂以外の温室効果ガスの増加が重要であるとは言え、主役はやはりCO₂であり、将来の温暖化の進行はCO₂濃度の増加のペースにかかっている。そこで、温暖化と気候変化を予測するには将来のCO₂濃度の予測が出発点となる。人工排出源、すなわち化石燃料消費と森林伐採については、もし何も対策を講じなければ経済発展に応じてこうなるであろうという (Business as Usual, BaU) シナリオが作られている。それをもとに大気中濃度の予測を行うのだが、それには大気・海洋・陸上生態系間の炭素循環の機構を明らかにして、それをモデル化しなければならない。この問題は、CO₂の直接観測が始められた頃から研究が続けられ大枠はわかっているものの不明の点も少なくない。その象徴としてCO₂のmissing sinkの問題がある。

1990年のIPCC報告では、1980年代の炭素収支を表1のように算出している。単位は1年当たり炭素量でギガトン (10⁹t) で表わしてある。人間活動により計7Gtが放出されて

表1 1980年代における人間活動により放出されたCO₂の収支。単位は炭素量で1年当たり10億トン (GtC/年)

人間活動による放出		
	化石燃料消費	5.4±0.5
	森林破壊	1.6±1.0
a	計	7.0
b	大気中での蓄積	3.4±0.2
c	海洋への溶けこみ	2.0±0.8
	不均衡(a-b-c)	1.6±1.4

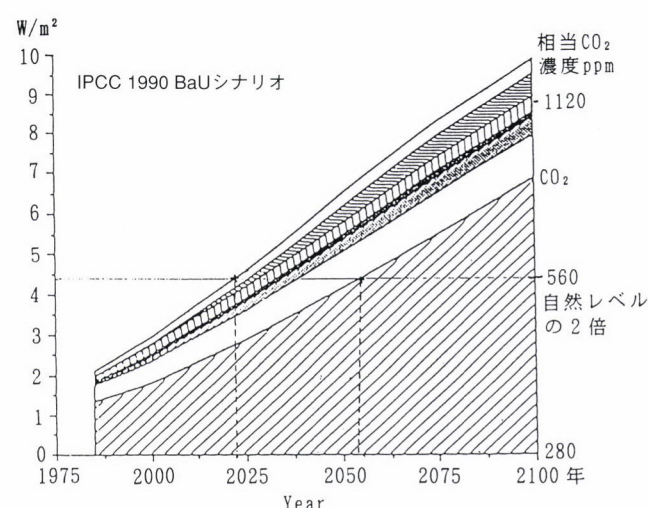


図6 何も対策をしなかった場合(BaUシナリオ)の各種温室効果ガスの増加による赤外線閉じこめ度(IPCC 1990より) (第24回白石記念講座 (1993年))

いるうち、海洋への溶け込みを除いても大気中に残留している分より1.6Gtも多く、その行き先が不明なのである。この不均衡の原因として、当時は必ずしもはっきりしなかったが(それゆえ missing sink と呼ばれた)、その後の研究により、この量はさまざまな形で陸上生態系に吸収されるものとして説明可能の範囲にあると考えられるようになった。その内訳は、第二次大戦後の植林により北半球中高緯度地域では0.5GtC/年の割合で森林のストックが増えつつある。このほかに、CO₂濃度が上昇することによって光合成が促進され既存の森林の炭素保有量が増加する肥沃化 (Fertilization) 効果が考えられ、農場における実験などをもとに0.5~2.0GtC/年の吸収があるとみられている。さらに、人間起源のNO_xが窒素肥料として成長を促進したり、温暖化による成長促進も見込まれるので、先の残差は説明可能というわけである。

ここで注意すべき点は、CO₂濃度の将来予測に当たって、陸上生態系による吸収もモデル化し、それを現状のデータで検定しパラメーターを決めている事である。CO₂増加による肥沃化で純生産量がCO₂濃度の上昇率に比例するとして係数を定めるが、現状の収支に幅があるため、ファクター2程度の不確定を生じる。実は、代表的値に合わせたモデルで計算すると200年後CO₂濃度が2倍になったとした場合、陸上生態系の炭素保有量は計500Gtに近い増加となるが、これは現存の植物体の量にほぼ等しく、信じ難い値である。

そのような問題点はあるものの将来予測をした結果は図6に示すようになっている。なお、これはIPCC 1990のもので、前記の陸上生態系の吸収は考えていない。最新のものではないが大筋は変わらない。図からわかるように、CO₂のみなら2060年ごろ自然状態の2倍になるが、他のガスの効果を含めると、2025年頃CO₂ 2倍相当に達し、21世紀末にはCO₂ 4倍相当にまで増加すると予想されている。

5 気候変化の推定

温室効果ガス増加の影響のメカニズムは、地表面からの熱放射の鉛直上方への伝達が妨げられる事にあるから、その大筋は先に記した鉛直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昇温を拡大する水蒸気量の差によって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。事実、地質時代の気候変動においては、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て来ている。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。ちなみに1992年リオの地球サミットで採択された条約は、しばしば「温暖化防止条約」と呼ばれるが本当は「気候変動枠組み条約 (Framework Convention for Climate Change)」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あり、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ものである。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て、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、海洋の水温や海水の分布、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CO₂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CO₂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

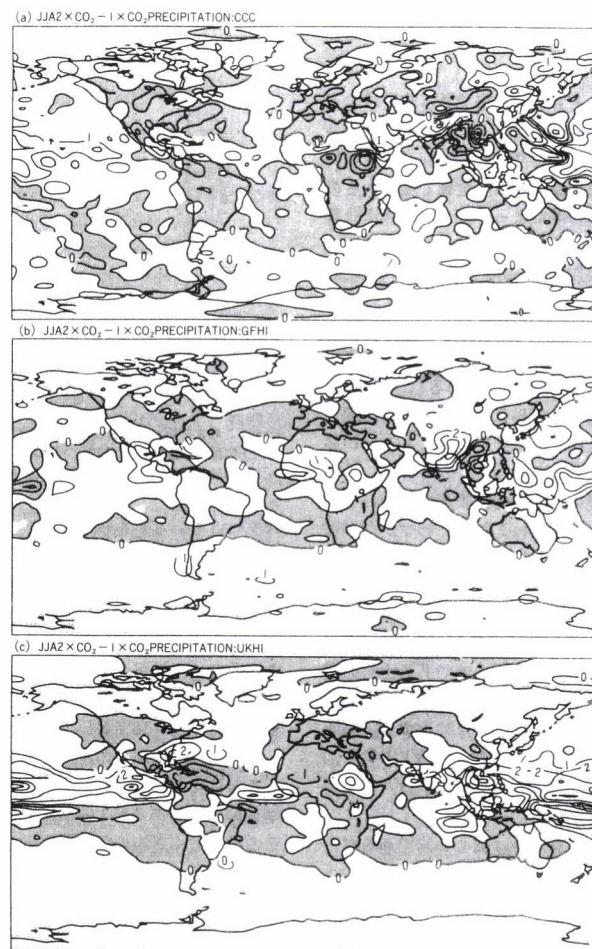


図7 3種類の気候モデルで得られたCO₂倍増平衡気候と標準気候との夏(6,7,8月)の降水量の差。CO₂2倍のほうに降水量が減少する領域に影がついてある。(a)はCCCモデル,(b)はGFDL高分解能モデル,(c)はUMKO高分解能モデル(IPCC報告,1990による) (第24回白石記念講座 (1993年))

できるものではない。というのは、気候モデルの中には複雑でまだ良くわからないプロセスが多くあり、それを少数の観測や物理的考察にもとづいて数式表現しているからである。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。一例として3つの研究機関のモデルで得られたCO₂2倍気候と現状気候との夏季の雨量の差を示す(図7)。これは一番計算が難しく結果のバラツキの最も大きい部類に属する。

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。(CO₂2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亜熱帯から中緯度に乾燥帯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・北アメリカでは、夏季土壌が乾燥する可能性がある。一方、東南アジアのモンスーン域では夏の雨量は増加し湿潤化の傾向にある。

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し、また日本近海で発生して十分に発達しないままのものが増えるという考えもある。

最近、気象庁・気象研究所で行われた大気海洋結合モデルでCO₂を徐々に増加させた実験によると、地球上の気温上昇の最大域の一つはオホーツク海周辺にあり、大きさはCO₂2倍時点で4℃にも達する。オホーツク海は北半球における海水の南限となっているので高温化によって海水が減少ないし消滅すると、それが更に昇温を拡大することが考えられる。定性的には納得のできる結果であり、今後詳しく調べる必要がある。

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。この値は世界中で多数行われた実験によって2℃～5℃という大きな範囲にばらついてしまう。その原因は、放射・対流平衡モデルの際に問題となった昇温に伴う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）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を調整（チューニング）するため、CO₂2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、

昇温を拡大するものと縮小するものと両方ありフィードバックの方向も決まっていない。この雲の取り扱いが気候モデルを改良する（真に近づける）上で最大の難点と考えられている。

6 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。「CO₂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。「CO₂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なか」という質問への答えを求めていたのである。現実にはCO₂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、CO₂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節の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なになっているか、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の熱吸収と海洋内部の循環もとり入れた大気・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

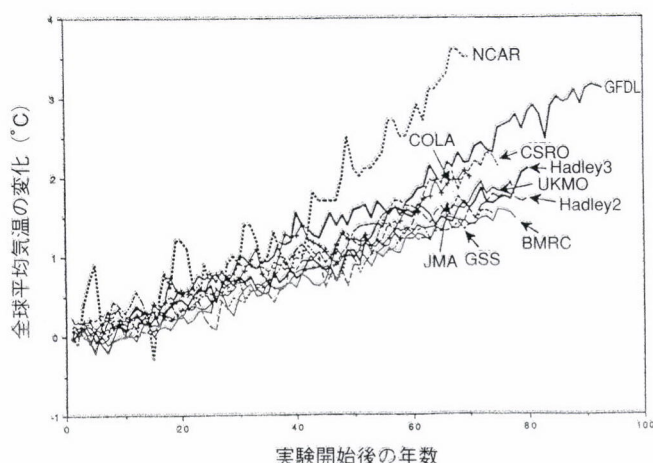


図8 大気海洋結合モデルでCO₂を徐々に(年率1%)増加させたコンピューター実験での全地球平均気温の変化。世界中の研究機関での結果。(IPCC 1995による)

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8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CO₂に換算し、年率1%と仮定してある。するとCO₂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。このような研究結果をもとに、IPCC 1990 では、何も対策を講じなかった場合、現在からCO₂2倍となる時点（2025年頃）まで昇温を約1℃と見積もった。

ところで図8は産業革命以後のCO₂増加を簡略化して（年率1%増）扱ったものであるから、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。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⁻²、図5）は、たまたまCO₂2倍時の半分となっている。そこで、それに相当する所（約35年）の昇温をみると0.8℃となり、これは過去100年余の昇温0.5℃～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。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（0.1 μm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CO₂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CO₂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25%ほど減少させる大きさ（放射強制力-0.5～-0.7Wm⁻²）を持つとされている。（まだそれ程確かではないし、筆者も計算根拠に疑問を持っている。）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が解消される。

7 おわりに

以上、地球温暖化予測の科学的根拠とその問題点を記して来た。不確定要因が多く残っていることは確かだし、例えば台風の数や強さはどうなるのか、と言った実際上の問題に答えられてもいない。しかし、基本的には物理法則に立った動かしようのない事実であり、これまでの観測データに照らしても「温暖化は確認されていない」という批判が的外れであることも理解して頂けたと思う。一方、経済活動の必要性から、ある程度の温度上昇と気候の変化は避け得ないと思われるので、自然の気候変動を含めてより確かな気候変化予測を行い、社会が変化に適応できるようにするのが地球科学者に課せられた任務と考えている。

（1996年5月9日受付）