

2 3 温暖化予測研究の世界的な取り組み

1988年のアメリカでの暑い夏を機に「地球温暖化」が一躍国際政治の問題になり、地球温暖化を科学的立場から評価を行う国際機関として「気候変動に関する政府間パネル（IPCC）」が設立された。

ここでは、そのIPCCがまとめた温暖化予測の進展と、それを支える気候モデル開発の世界的な枠組みを紹介する。

2 | 3 | 1 | IPCCの経過

温暖化予測では、温室効果ガス（CO₂など）とエアロゾルの排出シナリオを気候モデルに与えて計算を行い（数値実験と呼ぶ）その結果を解析して影響評価を行う。これらの進歩とIPCCの活動が【表1】にまとめられている。

この10年の間に気候モデルは、海洋の熱力学的効果のみを取り入れた、大気を中心とした大気大循環モデル（A-GCM）から、海洋大循環も取り入れた大気・海洋結合モデル（AO-GCM）へと発展した。予測手法については、大気中のCO₂濃度を2倍に固定する「CO₂倍増平衡実験」から、大気中のCO₂を徐々に増加させて温暖化の時間発展をみる「漸増実験」が行われるようになった。

【表1】 排出シナリオ - 気候モデル（GCM） - 影響研究の推移（IPCC, 2001b）

年 代	IPCC報告書	GCM実験	影響評価に用いた GCM実験	排出シナリオ
		（第1作業部会）	（第2作業部会）	（第3作業部会）
1988～1990	第1次評価報告書（1990）	高分解能A-GCM CO ₂ 倍増平衡実験	低分解能GCM CO ₂ 倍増平衡実験	シナリオA-D（A：なりゆきシナリオ）
1990～1992	補足報告書（1992）	AO-GCM・漸増実験 Cold Start GHGのみ （IS92a シナリオ）	低分解能GCM CO ₂ 倍増平衡実験	IS92a-f（IS92a：なりゆきシナリオ）
1993～1996	第2次評価報告書（1996）	AO-GCM・漸増実験 Warm Start, GHG+エ アロゾル（0.5%或いは1%/年）	低/高分解能GCM CO ₂ 倍増平衡実験 Cold Start漸増実験	IS92a-f（改良版）
1997～1998	地域影響の特別報告書（1998）	AO-GCM・漸増実験 アンサンブル/多世紀 基準実験	低/高分解能GCM CO ₂ 倍増平衡実験 Cold /Warm Start 漸増実験	IS92a-f（改良版）
1999～2001	第3次評価報告書（2001）	AO-GCM・漸増実験 CO ₂ 安定化：SRESシ ナリオ	Warm Start漸増実験 アンサンブル/数世紀 基準実験	SRESシナリオ 安定化シナリオ（ポストSRES）

2 | 3 | 2 | 気候モデルの開発

気候モデルの開発はそれぞれの気候センターで行われているが、国際的に協調して行われているのは、WCRP（世界気候研究計画）を通してである。

WCRPには、

GEWEX（Global Energy and Water Cycle Experiment；全球エネルギー・水循環研究計画）

CLIVAR（Climate Variability and Predictability；気候変動性・予測可能性研究計画）

CliC（Climate and Cryosphere；気候と寒冷圏）

SPARC（Stratospheric Processes and Its Role in Climate；成層圏プロセスとその気候における役割研究計画）

の4つの副プログラムが存在するが、そのそれぞれに、数値モデルの開発を行うワーキンググループを持っている。

この中で、気候モデルの開発に密接に関係しているのが、CLIVARの中に存在する結合モデルに関するワーキンググループ「結合モデル作業部会（WGCM）」である。

モデル相互比較

国際的な気候モデルの開発を推進するため、実験設定を共通にした数値積分を行い、実験結果の相互比較により気候モデルの性能を比較したり、気候変動・変化のメカニズムを探求する研究計画が色々行われている。Model Intercomparison Program（MIP）に修飾語がついたものが多い（<http://www-pcmdi.llnl.gov/amip/>参照）。この中で、「結合モデル作業部会（WGCM）」が主催するCoupled Model Intercomparison Project（CMIP）は地球温暖化予測モデルに関して中心的役割を果たしてきた。IPCCではシナリオの現実性の追求が政策的立場から不可欠だが、CMIPでは、CO₂倍増や1%漸増を用い、科学的な立場からの温暖化説明が主眼とされている。

ところでIPCCの次期第4次報告書では、炭素循環と共に気候モデルの高分解能化【11】が焦点になっている。当初の気候モデルの大気に対する格子間隔は約500km前後、IPCCの第2次と第3次報告書では、約250km程度の気候モデルが用いられたが、地域的な気候影響や異常気象への影響評価に関する要請も多く、さらに細かい格子間隔の気候モデルの開発が進められている。例として、現在日本では、後述の地球シミュレータを用いた「人・自然・地球共生プロジェクト」の中で、高分解能の気候モデルによる地球温暖化予測に取り組んでいる。米国ではこれまでの2つの気候モデルを合体したCommunity Climate System Model

【11】分解能

空間の中の離れた二つの地点の現象を識別することのできる最小距離。高分解能とは、よりスケールの小さい現象を識別できることを意味する。

(CCSM)が開発されている(<http://www.ccsm.ucar.edu/>)。一方、ヨーロッパ連合(EU)でも様々な気候要素モデルを結合して地球システムをシミュレートしようとするPRISM(PRogramme for Integrated earth System Modelling)計画が策定されている(<http://prism.enes.org/>)。

2 4 温暖化予測研究の日本の取り組み

2 | 4 | 1 | 日本における温暖化予測研究のあゆみ

【12】数値天気予報

大気の従う、運動方程式、質量保存、エネルギー保存などの物理法則を、微分方程式の形に書き表わし、さらにそれを差分の形に変形して、計算機プログラムにする。変数は、地球を覆う緯度・経度・高さの3次元格子上的、気圧・気温・風速・水蒸気量である。初期値は、毎日グリニッジ時間の0時と12時のラジオゾンデをはじめとする気象観測の結果を基にして作る。

気候変化のコンピューター・シミュレーションは毎日の天気予報の基になる「数値天気予報」【12】を母胎として生まれ発展して来た。1950年代アメリカにおいて電子計算機の誕生と共に生まれた数値天気予報は、日本にもすぐさま取り入れられ、1959年に気象庁が当時の世界最大級のコンピューターを導入することによって世界で3番目に早く業務化された。

しかし、世界全体として、真に実用化されたのは、1980年代とあってよい。コンピューターの能力が複雑な気象モデルの計算を可能にするほどに向上したことと、気象衛星によって常時地球全体の気象を監視する体制ができたことによる。日本(気象庁)は、1977年に気象衛星「ひまわり」の第1号を打上げて以来、アメリカ、欧州連合と共に気象衛星観測を行うようになり、数値天気予報でも、米欧と並ぶ成績を収め続けて来ている。

数値天気予報を1か月、1年と延々と続ける(その際、気象のみでなく海洋や陸地の変化も計算する)ことによる気候のシミュレーションは、数値天気予報とほぼ同時に始められたが、膨大な計算量を必要とすることと、地球科学の基礎研究の中では緊急性を要していなかったことから、アメリカの大きな研究機関でしか行われていなかった。

1970年代に入って、地球温暖化が現実になり得るとの考えが専門研究者の間で確かなものとなる一方、産業をはじめ人間活動の拡大によって社会が異常気象のような気候の自然なゆらぎにも敏感になってきたため、一般社会や政府に向けてそれらの危険性が訴えられるようになった。その結果アメリカでは多数の研究機関で気候シミュレーションが行われるようになり、欧州でも1970年代に研究機関がいくつか新設され、研究が始められた。

日本では、コンピューター能力の不足もあって大学での研究は大気・海洋現象の解明を目指した簡略モデルによる基礎研究にとどまり、唯一気象庁の気象研究所で本格的モデル開発のための準備的研究が続けられていた。そして1980年、気象研究所の筑波移転を機に、専用コンピューターが導入されようやく気候モデルの開発が始められた。

1988年のアメリカでの暑い夏を機に「地球温暖化」が一躍国際政治の問題になり、その根拠がコンピューターによる気候シミュレーションである事が広く知られるようになると、1990年代に関連諸機関でコンピューターの導入と気候研究の強化が図られた。

1990年に国立環境研究所に省庁を超えた共同利用のスーパーコンピューターが導入され、1991年に大学共同利用の気候システム研究センターが東京大学に設置された。1997年に、当時の科学技術庁傘下の宇宙開発事業団と海洋科学技術センターの共同研究プロジェクトとして、地球フロンティア研究システムが開始され、同時に、世界最大の並列スーパーコンピューターを製作する「地球シミュレータ」計画が始められた。このスーパーコンピューターは2002年初頭に完成し、同年3月から運用が開始された【図4】。

こうして研究体制の面で、欧米に約10年の遅れを持って出発した日本の研究陣は、今ようやく世界のレベルに並ぶべく努力をしている所である。



【図4】地球シミュレータ

2 | 4 | 2 全球気候モデルによる温暖化予測研究

前節で紹介した日本の計算機環境の下で、1980年代末期から現在にかけて気象研究所（MRI）および東京大学気候システム研究センター・国立環境研究所（CCSR / NIES）など各々で開発された気候モデルによる温暖化実験が行われた。また、地球研究フロンティアシステムでは発足と同時に温暖化研究の第一人者真鍋淑郎博士が米国から戻って参加し、温暖化メカニズムの研究が行われた。ここでは、これら日本の研究で得られた成果の一部を紹介する。

気象研究所

気象研究所では1980年の筑波研究学園都市移設に伴い、大型計算機（当時では日本最速のコンピューター）が導入され、大気大循環モデルの開発と、それを用いた多くの気候感度実験が行われた。

その後、地球温暖化が懸念されるようになった1980年代後半からは、計算資源のかなりの部分を割いて、温暖化予測実験が行われるようになった。その成果は、気象庁から「温暖化予測情報」第 〃、〃、〃、〃巻として刊行され、主要データはCD-ROM化され、温暖化の影響評価に利用されている。また、これまでのIPCC評価報告書にも以下のように反映されている。

第1次評価報告書（IPCC，1990）に向けて、大気大循環モデルと厚さ約50mの海水の熱容量のみを考慮した海洋混合層モデルを結合したモデルを用いて、CO₂倍増平衡実験を行った【表1】。

大気大循環モデルでは、積雲対流【13】による降水と、水蒸気が大規模運動による降水【14】を区別している。これを利用して、温暖化に伴って、それぞれの降水の頻度分布と面積分布がどのように変化するか 降水様式の変化を調べた。その結果、温暖化すると積雲対流性の降水が増えると共に、地球全体に占める面積の割合が減少する、つまり、降水の集中化が生じることが分かった。

しかし、第3次評価報告書（IPCC，2001a）では、温暖化すると対流性の降水が減少する、というドイツでの実験報告が紹介されている。つまり降水様式がどう変化するかについては、温暖化した気候での大気の安定度の変化や大規模循環の変化とも関係しており、今後の課題として残されている。

第2次評価報告書（IPCC，1996）に向けて、気象研究所がわが国で最初に開発した大気・海洋結合モデルを用いてCO₂漸増実験を行い、その成果は、気候モデル予測の章に反映された。

気象研究所の大気・海洋結合モデルの開発においては、太平洋域の自然変動で最も顕著なエルニーニョ・南方振動（ENSO）【15】の再現性を高めることに重点が置かれた。実際の気候変化の、自然変動による変化とCO₂の増加による複合効果を再現することが重要と考えられたからである。その結果、エルニーニョが再現され、また、太平洋域で観測されている20～30年周期の自然変動も再現することができた。それを基にCO₂を4倍にまで漸増した実験をして温暖化パターンをみると、ラニーニャ時の変動パターンによく似ていることが明らかになった【図5・左】。

次に、海洋の熱容量の効果のみを扱う大気・海洋混合層結合モデルで同様の実験を行うと、エルニーニョに似た自然変動が再現され、大気モデルは共通でも、今度はエルニーニョ時の変動パターンに似た温暖化パターンが得られた【図5・右】。

【13】積雲対流

地表面の熱エネルギーを対流圏上層に輸送する熱エンジンの役割を果たすもの。西太平洋域からインドネシアにかけてが最も活発。

【14】大規模運動による降水

気候モデルで用いられた格子間隔で分解出来るスケールの大気の流れに結びついた降水で、主に温帯低気圧に伴うものである。

【15】ENSO

エルニーニョ現象が発生しているときは、貿易風が弱く、西側の暖水は通常より薄く、また東側の冷水の湧きあがりは弱くなる。このため、中部から東部太平洋赤道域の海面水温が通常よりも高くなり、それに伴って雲が盛んに発生する海域も通常より東に移動する。地上気圧については南太平洋東部で平年より高く（低く）なるとインドネシア付近で平年より低く（高く）なるといふ、シーソーのように変化をすることが今世紀初

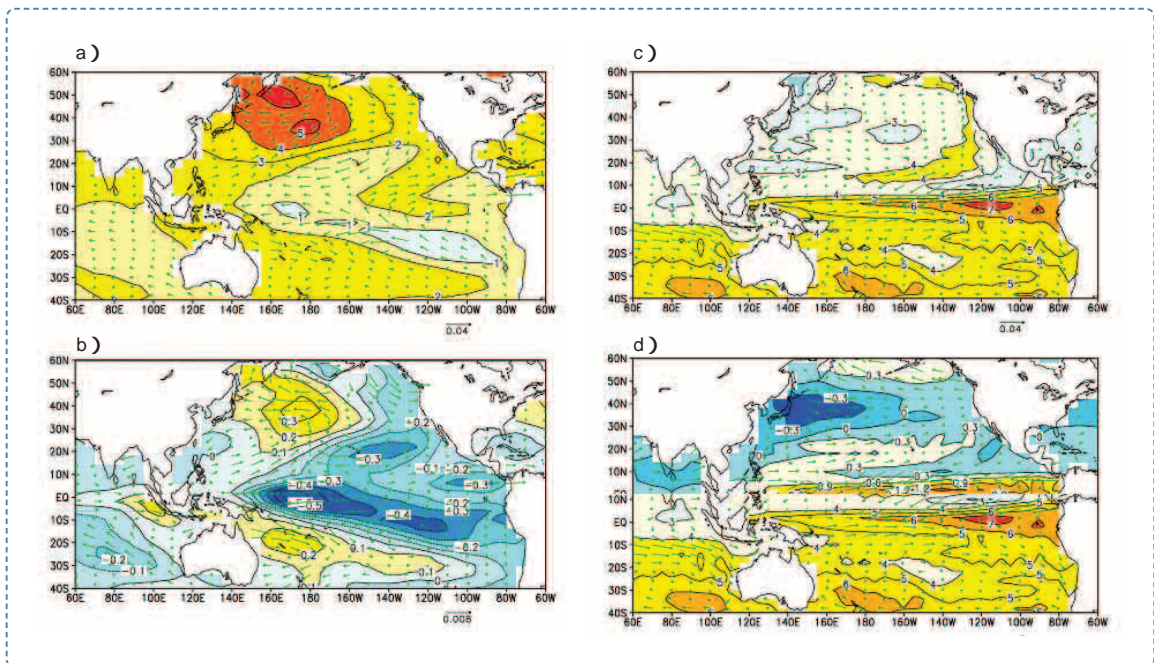
このような、自然変動と温暖化パターンの対応は世界の多くの大気海洋結合モデルによる温暖化実験でも認められ、IPCC第3次評価報告書ではエルニーニョ類似の温暖化パターンとして引用されている。

第3次評価報告書では、より高分解能の気候モデルを用いて温暖化実験を行うためにモデルの高速化を図った。そして第3次評価報告書のために作成された、温室効果ガス排出シナリオ（SRESシナリオ）を用いた温暖化予測実験を行い、その結果は、気候モデルによる予測結果として、報告書に掲載された。

しかし、これまでの気候モデルでは、台風、地域的な異常気象、集中豪雨などを扱うには分解能が足りず、IPCCでも、これらの温暖化による影響評価は、次期報告書への課題として残された。気象庁が行っている日々の天気予報から週間・季節予報では、まさにこれらの現象の予報がターゲットであり、予測結果と観測を比較することによりモデルの検証が常に行われている。ここでのモデル検証が有効に活用できるように、気象庁・気象研究所では、週間・季節予報から温暖化予測まで用いることの出来る統一気候モデルの開発を進めている。

頭から知られており、南方振動と呼ばれていた。

現在では、この南方振動とエルニーニョ現象は、大気と海洋が密接に結びついた同一の現象のそれぞれ大気側、海洋側の側面として認識されている。このため、両者を併せてエルニーニョ・南方振動（ENSO）と呼ぶ。



【図5】温暖化パターンと自然変動モードの比較。気象研究所大気・海洋結合モデルによる。
 a) CO₂ 1% / 年（複利）漸増による100年後（91～110年の20年平均）の海面水温の上昇と地上風の変化、b) 最も卓越する海面水温変動モード。海洋を厚さ約50mの海水の熱容量のみ考慮した海洋混合層モデルに置き換えたモデルによる、c) CO₂倍増平衡実験による海水温度の上昇と地上風の変化、d) 最も卓越する海面水温変動モード。（参照：野田，2000）

東京大学気候システム研究センター / 国立環境研究所

東京大学気候システム研究センター（CCSR）では、国立環境研究所（NIES）と共に、1990年のCCSR発足後、大気大循環モデル（CCSR/NIES AGCMと呼ばれている）や気候モデルの開発を始め、地球温暖化予測も行ってきた。

最初の気候モデルは、大気大循環モデルと、東京大学理学部地球物理学教室で開発されていた海洋モデルを結合したものであった。このモデルを用いて、CO₂を瞬時に2倍にした場合や、年率1%で上昇させた場合の地球温暖化などの計算を行った（阿部，1997）。その結果、CO₂の倍増に関しては、全球平均の地表気温で約2℃の上昇が生じるという結論が得られた。温度上昇の水平分布については、多くのモデルと共通のパターンを示し、また降水量の変化に関しては、基本的にENSO的な降水量変化を示した。

次に、エアロゾルを取り入れて、その直接効果【16】を知るための実験が行われた。この直接効果を取り込む手法としては、アルベドを変化させる手法ではなく水蒸気との相互作用も考慮しながら直接計算する手法を用いた（Emoriら，1999）。そうすると、エアロゾルの直接効果はそれほどには大きくないこと、また、アルベドを変化させる計算方式では過剰にエアロゾルの直接効果を評価していることが分かった。

引き続き、第3次報告書に向けて、エアロゾルの間接効果を入れ込んだ温暖化予測実験を行った（Nozawaら，2001）。結果は意外なもので、間接効果を入れたのだから温暖化の程度は低くなると考えられたが、予想外に温度上昇が大きくなってしまった。

なぜこのような結果が出たかという点、実はこの実験の前に、気候モデルの改良をいろいろ行っていた。水蒸気場の表現を良くするために、大気境界層【17】のサブルーチンを変更したり、雲水から雨水への変換率を変えたりした。つまり、これらの変更がこの変化を起こした可能性は十分考えられる。

そこでそれらの改良の影響を調べるために、海洋混合層モデルと結合した大気モデルを用いて計算を行った。その結果が、【図6】に示してある。これらの変更によって、CO₂の倍増時の温度上昇に1℃程度の差異ができることが分かる。同時に、他のセンターの気候モデルによる温度上昇が示してあるが、それらも大体この範囲に散在している。この理由を推測すると、各地の気候センターの気候モデルは各々いろいろな物理過程のサブルーチンを使っている（決まった基準がない）ため、ちょうど、CCSR/NIESのモデルで物理過程のサブルーチンを変えたのと同程度の差異が示されたのだと思われる。

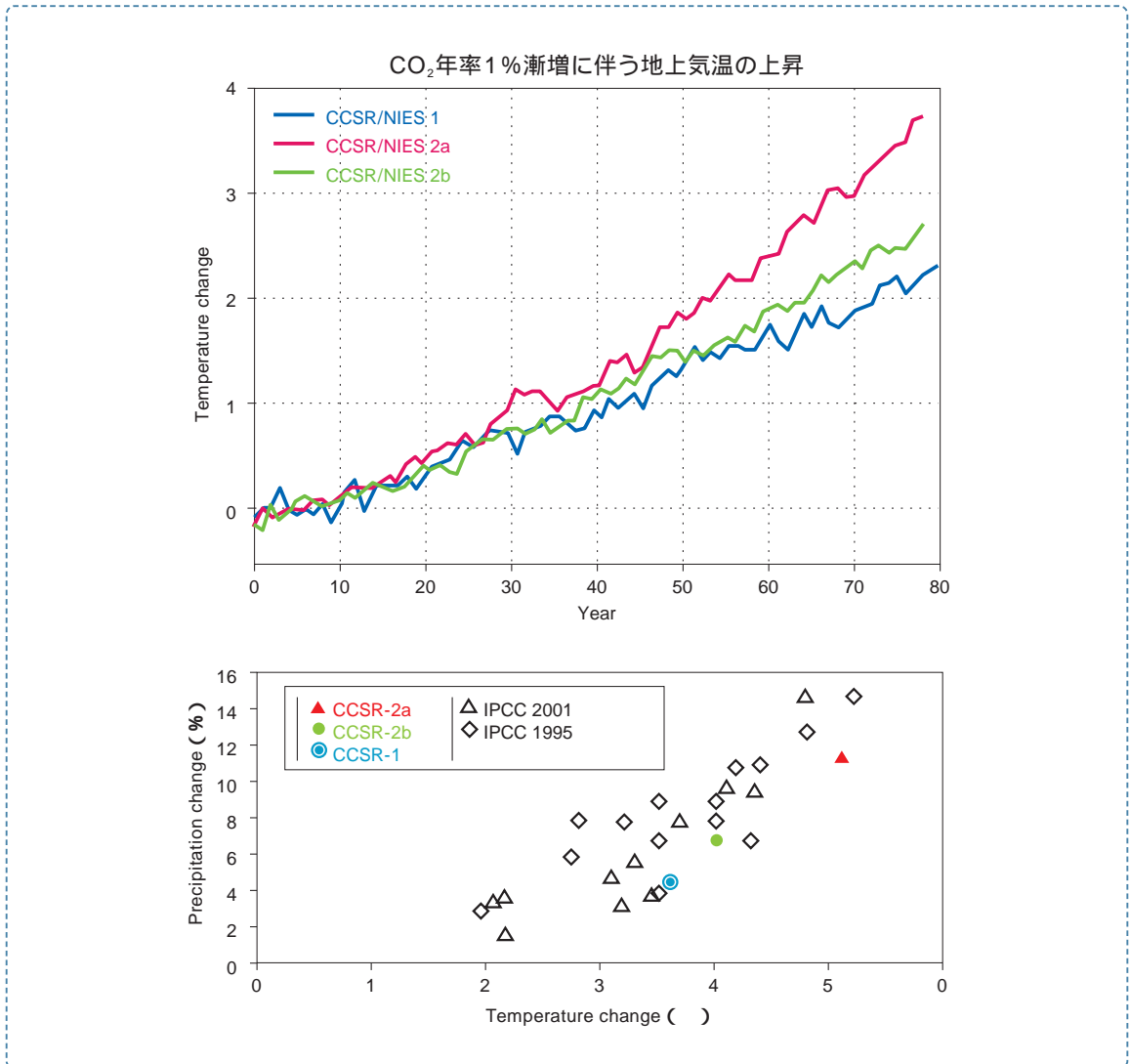
現在の我々の知識では、どの方法が正しいかを判断することができない。だから、この程度の不確かさは避けることができないと考えられる。

【16】直接効果

エアロゾル自身が太陽放射を散乱・吸収して地上に達する日射を減少させる効果を直接効果といい、エアロゾルが凝結核となって雲の光学的性質や寿命を変える効果を間接効果という。

【17】大気境界層

地球表面の大気の摩擦の効果が大きな役割を果たしている大気の下層数百mの層。この層には、大気と地球表面の間でのエネルギー・運動量・質量（水蒸気、CO₂など）の交換量を決める上で重要なプロセスが含まれている。



【図6】(上)旧モデルの温暖化の結果(青線)、境界層過程を入れ替えた場合の温暖化の結果(緑線)、そして、放射テーブルを変更した場合の結果(赤線)。同一モデルでも、温暖化の程度はこのぐらいは異なる。(下)上の結果を、他のモデルの結果と比べた図。赤、緑、青の三角が上の結果に対応する。(住, 2001)

地球フロンティア研究システム

地球フロンティア研究システムでは、温暖化に伴う台風・温帯低気圧など気象の変化のシミュレーションのほか、温暖化による雲や水蒸気の変化が、フィードバックして温暖化にどのような影響を及ぼすかという様々なフィードバック効果の研究が行われてきた。

ここでは、IPCCの第1次報告書以来の最大の難問である雲のフィードバックについての分析を紹介しよう。

1990年にそれまで世界各国の研究機関で行われていた、CO₂が2倍

のときの平衡状態気候のシミュレーションの結果がIPCCによって初めてまとめられた。報告書のまとめに当たり、驚いたことはCO₂が2倍になった時の全地球平均気温の増加が1.9~5.2 という広い範囲にばらついていたことである。この大きな広がりの原因はCO₂そのものの温室効果（赤外線遮蔽）ではなく、その結果として生じる水蒸気、雲、積雪、海氷など様々な気候状態の変化のフィードバックによって生じたものであり、さらにその後の研究によって雲のフィードバックが最も大きなばらつきの原因である事が明らかになった。

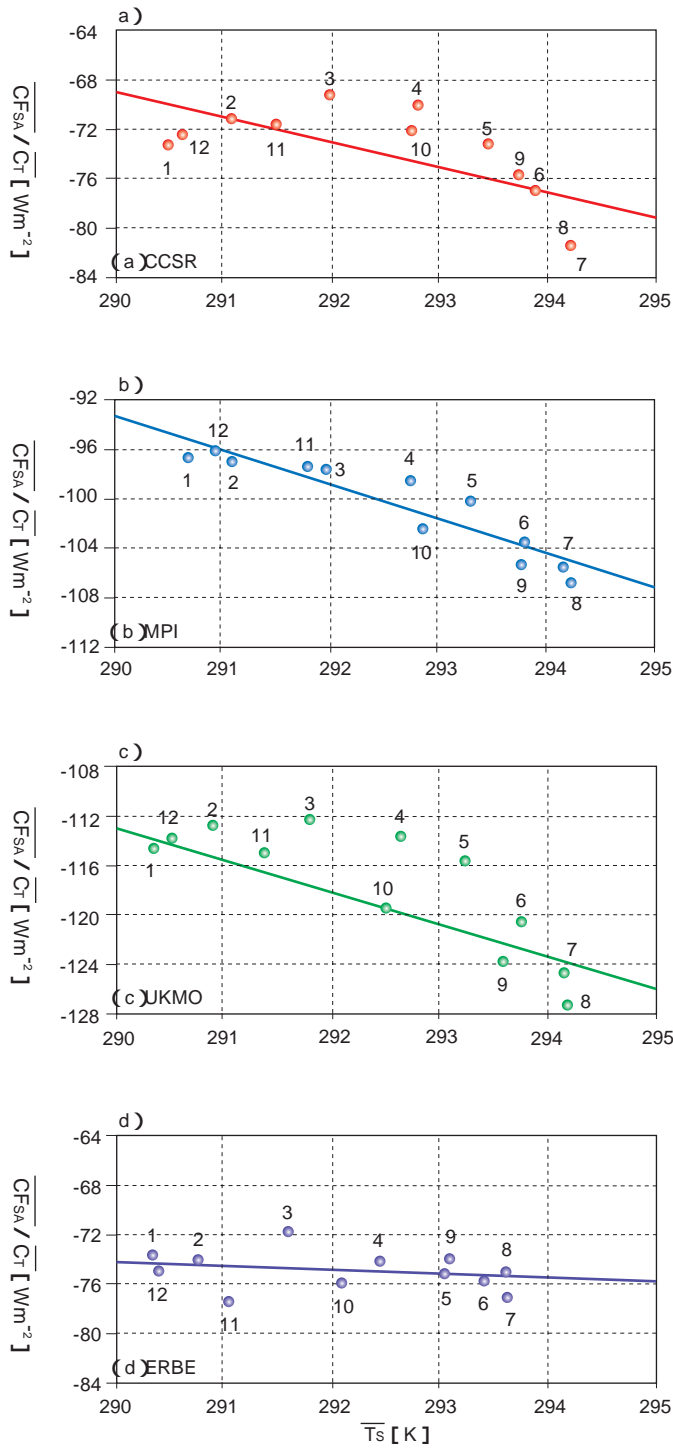
雲の放射への影響は下層雲・上層雲の違い、日射への影響と赤外放射への影響といった多様な組み合わせがあり、大変複雑で理解や予測が困難である。中でも、温暖化が進むと雲の白さ（日射反射率）はどう変化するかということが問題であった。この効果をどのように扱うかの差が温度上昇の両極端を生み出した事は、環境問題についての批判の書として話題になっている「The Skeptical Environmentalist」（Lomborg, 2001）に述べられている通りである。

この問題に対する答を与えるのは容易でないが、そのヒントを与えてくれる現象がある。それは各月ごとに全地球平均気温を調べると、北半球の夏（6、7、8月）は高く、南半球の夏（12、1、2月）は低く、その差は3℃にも達するということである。この大きさはちょうどCO₂が2倍になった場合と同じである。この1年をサイクルとする変化は、南北の陸地分布が非対称であるから起こると思われる。

この現象は、全地球の一様な温暖化とは少し性質が異なるものの、もしかすると温暖化の替わりになり得るのではないかと、という予測の下に観測とモデル計算の結果の解析が行われた（Tsushima and Manabe, 2001）。具体的にいうと、この1年のサイクルに伴う雲の日射反射率の変化を、地球放射収支実験（ERBE）衛星による実際観測のデータと、三つの気候モデルで調べてみたのである。

【図7】がその結果で、各月の平均気温を横軸に、単位雲量当たりの日射反射量を縦軸にとって、12か月の変化を表わしたものである。この図から読み取れることは、実測データでは1年のサイクルを通じて雲の日射反射はほとんど変わらないが、わずかながら地球平均気温の高い月ほど反射が大きくなる傾向にあること、一方モデル計算の方は、三つのどれもが高温の月ほど雲による日射反射が大きくなっていることである。

おそらく、温度が高くなると大気中の水蒸気量が増えるので、その中で生じる雲の持つ雲水量（一定体積中に存在する雲粒の総質量）は大きくなり、それに応じて雲粒が反射する日射量も増加する、という一連のプロセスがどのモデルにも組み込まれていたということだろう。これに対して現実の大気では雲の反射はほとんど変化していない。このことから、反射率を介しての雲の負のフィードバック（温暖化を抑制する）効果がモデルでは過大になっていたものと推定される。



【図7】(a)CCSR、(b)MPI、(c)UKMO各気候モデルにおける単位雲量あたり短波雲放射強制力(日射反射率とみなしてよい)の各月平均値の1年間の変化。全地球平均気温(12、1、2月に低く、6、7、8月に高い)を横軸にとって示してある。(d)はERBEデータから求めた観測値を同様にプロットしたもの。(Tsushima and Manabe, 2001)