

第 3 章

3

温暖化はどのように
予測するか

第3章 温暖化はどのように予測するか 目次

我孫子研究所	環境科学部長	上席研究員	丸山 康樹
我孫子研究所	環境科学部	主任研究員	吉田 義勝
狛江研究所	研究調査担当	上席研究員	西宮 昌
狛江研究所	大気科学部	上席研究員	加藤 央之
狛江研究所	大気科学部	主任研究員	西澤 慶一
狛江研究所	大気科学部	主任研究員	大島 直子
狛江研究所	大気科学部	主任研究員	門倉 真二
狛江研究所	大気科学部	主任研究員	和田 浩治
我孫子研究所	環境科学部	主任研究員	仲敷 憲和
我孫子研究所	環境科学部	主任研究員	坪野 考樹
我孫子研究所	環境科学部	主任研究員	筒井 純一

3 - 1 全球規模の気候変化.....	34
コラム4：CO ₂ 排出量から大気中濃度の推定.....	38
コラム5：ACACIAプロジェクト『21世紀の気候変化予測』.....	39
3 - 2 地域規模の気候変化.....	40
コラム6：エアロゾルの気候影響.....	45
コラム7：地球温暖化のエネルギー分野への影響.....	46
3 - 3 地域海洋の変化.....	47
3 - 4 台風の変化.....	49
コラム8：長期再解析プロジェクト.....	51
3 - 5 まとめ.....	52

丸山 康樹（8ページに掲載）



吉田 義勝（1999年入所）
大気モデル、海洋モデル、大気海洋結合モデルによる高速計算、超並列計算等の計算科学的研究、大気海洋結合モデルを用いた温暖化予測研究に取り組んでいる。

西宮 昌（8ページに掲載）



加藤 央之（1983年入所）
入所以来、大気環境問題に関連した気象メカニズム解析等に従事。1990年代から温暖化問題に携わり、1年余の影響評価に関するEPRI共同研究を経て、気候トレンド解析、地域気候モデルの開発、温暖化予測・評価研究に取り組んでいる。



西澤 慶一（1992年入所）
 専門分野は気象学。入所後、米国大気研究センターとの共同研究として地域気候モデルの開発に携わり、放射モデル・陸面モデルの改良を実施。現在は、地球温暖化に伴う東アジアの水循環変化の予測に取り組んでいる。



大島 直子（1995年入所）
 入所以来、地球温暖化にともなう東アジアにおける気候変動予測研究に従事。主に統計的ダウンスケーリングを用いた地域気候変化予測手法の開発を担当。

門倉 真二（22ページに掲載）



和田 浩治（1998年入所）
 気象学を畑とし、入所以来、夏季の異常気象の発生メカニズムに関する研究に従事。現在、地球温暖化に伴う気候極値の変化に取り組んでいる。



仲敷 憲和（1986年入所）
 入所以来、温排水拡散予測、CO₂海洋貯留等の海洋環境問題に従事。NCAR長期出張後、現在は全球気候モデルの高度化に係る海洋関連部分を担当。また、地域海洋モデルの開発にも従事し、温暖化時の日本周辺の海洋環境変化の予測に取り組んでいる。



坪野 考樹（1995年入所）
 入所以来、温排水拡散予測に関する研究に従事してきた。現在、地域海洋モデルの開発にも従事し、日本周辺の海洋流動の再現計算を行い、CO₂増加後の日本周辺海域の環境変化予測を行う。



筒井 純一（1991年入所）
 入所以来、数値シミュレーションによる温暖化予測研究に従事。特に、温暖化が台風の諸特性におよぼす影響に関する研究に主体的に取り組む。現在は、台風研究に加え、様々な環境予測研究の基盤となる高精度の気候データセットの作成にも携わる。

3 - 1 全球規模の気候変化

3-1-1 はじめに

CO₂などの温室効果ガスが増加した場合、地球全体（これを全球と呼ぶことにする）に対する100年以上の長期の気候変化は、高度かつ複雑な数値モデルにより、スーパーコンピュータを用いて予測されている。この数値モデルは、一般的に、大循環モデルGCM（General Circulation Model）あるいは単に気候モデル（Climate Model）と呼ばれている（注参照）。

IPCCの第二次評価書（1995年）が出版された時点では、全球大気モデルAGCM（Atmosphere GCM）と全球海洋モデルOGCM（Ocean GCM）を結びつけたモデルAOGCMが各国の研究機関で使用されるようになった。このAOGCMは大気・海洋結合モデルあるいは単に結合モデル（Coupled Model）と呼ばれている。

しかし、第一次評価書（1990年）の出版時点では、気候モデルはより単純であった。つまり、世界の約70%を占める海洋は、水深50m程度の一つの層（レイヤー）として近似されていた。この単純化された海洋を全球大気モデルに結合した気候モデルは、大気・海洋混合層モデルと呼ばれていた。このモデルでは、ある大気中CO₂濃度に対して、その状態での大気の平衡状態を求めことしかできなかった。例えば、2倍濃度の平衡状態から、現状濃度の平衡状態を差し引くことにより、温暖化時の気温上昇 ΔT を推定していた。このため、「CO₂の増加に伴って温暖化が何時頃からどの程度の規模で生ずるか？」といった疑問には答えることができなかった。なお、この ΔT は気候感度（Climate sensitivity）と呼ばれ、気候モデルの特徴を示す一つの尺度として現在でも使用されている。

CO₂大気中濃度の将来の増加程度を想定し（濃度シナリオと呼ばれる）、そのシナリオの元で地球がどの

ように温暖化するかを予測できるようになったのは、大気・海洋結合モデルが使用され始めた1995年頃からである。つまり、温暖化の予測研究は、意外に歴史の浅い研究分野と言える。しかし、このころの大気・海洋結合モデルは、深刻な問題点を抱えていた。フラックス調整（flux adjustmentあるいはflux correction）と呼ばれるもので、気候モデルで計算されたフラックス（運動量、熱、淡水）を人為的に調整することを意味する。これは気候モデルの不完全さを示すものと考えられ、温暖化予測の信頼性に疑問が投げられていた。例えば、ある大気・海洋結合モデルを用いて現状の再現計算を行うと、気温が一定とならず、非現実的に上昇あるいは下降し、現状気温とのズレが生じた、としよう。このズレを防止するため、大気と海洋間で交換されるフラックス（運動量、熱、淡水）の計算値を人為的に修正することをフラックス調整と呼ぶ。

この問題点が解決され、フラックス調整無しで温暖化予測が可能になったのはおよそ1997年以降のことである。本節では、まず、当所が米国大気研究センターNCAR（National Center for Atmospheric Research）との共同研究の一環として、フラックス調整なしの結合モデルにより実施した全球温暖化予測結果について紹介する。

信頼性の高い気候モデルが出現すると、20世紀に観測された気温上昇の再現計算が可能になり、計算結果と観測値とを直接比較することができるようになった。この研究成果は、IPCCの第三次評価書（2001年）でレビューされ、気温上昇は人為的な影響であるとの有力な判断材料となっている（1-1章のコラム2参照）。

また、観測データと比較することにより、気候モデルの精度を検証することが可能になり、温暖化予測の信頼性を判断できる客観的データが提供されるようになってきたことも最近の大きな進歩である。当所が参加した国際共同研究ACACIA（本節のコラム4参照）では、フラックス調整を行わないモデルを用いて、過去の気候の再現計算を行うとともに、CO₂濃度安定化シナリオの温暖化防止効果について将来予測を実施した。本節では、次に、この結果についても紹介する。

（注）海面上昇の原因となるグリーンランドや南極の氷床の融解、海洋の深層への熱輸送による海水膨張等は、非常にゆっくりした現象である。このため、海面上昇は数百年～1000年程度の超長期の現象となり、気候モデルでは直接予測できず、気温上昇等の予測値から別の方法で推定されている。

3-1-2 125年間の温暖化予測

当所では、1992年から米国NCARと共同研究を実施してきている。NCARでは、フラックス調整を行わない結合モデルCSM (Climate System Model) の開発を進め、CO₂濃度一定とした300年間の連続計算を行い、温度ドリフトがないことを確認した (Climate System Model Special Issue, 1998)。しかし、このモデルは計算時間が長くなることから、温暖化予測計算は電中研が分担実施することになった。1997年、NEC、SONYの協力を得て、NECの並列スーパーコンピュータSX-4/32CPU (ピーク性能64Gflops) を用いて125年間の温暖化予測を実施した。

モデル概要

図3-1-1に、温暖化予測に用いた大気・海洋結合モデルNCAR・CSMの構成を示す。このモデルは、大気、海洋、海氷、地表面 (陸面) の4つのサブモデルから構成され、約45万行程程度の複雑な3次元プログラムである。各サブモデル間のフラックス (運動量、熱、淡水) はFlux couplerと呼ばれるサブプログラムを介して各要素モデルに伝達される。各サブプログラムは並列コード化されており、それらを結合する方法にはMPIと呼ばれる並列計算用の通信技術が使用されている。この方法は、多数のCPUから構成される並列スーパーコンピュータを効率的に利用出来る点で優れた方法と言える。

濃度シナリオ

地球温暖化の予測にあたっては、まず、将来の大気中

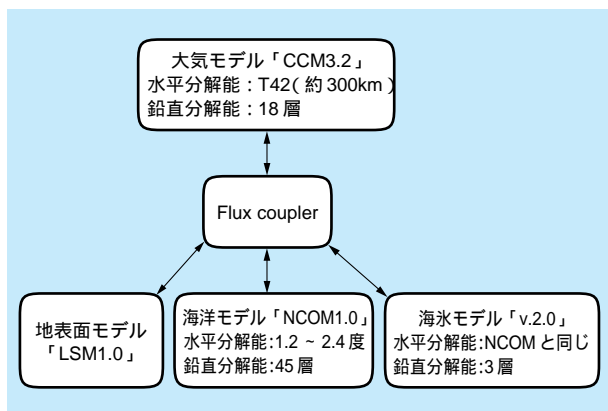


図3-1-1 温暖化予測モデル (NCAR・CSM) の構成

CO₂濃度を前提条件として決定する必要がある。予測に用いたシナリオを図3-1-2に示す。このシナリオでは、10年間は355ppm (1991年時点の濃度) で一定として、その後は年率1%で115年間増加させる。この増加率では、70年後に現状の約2倍濃度、110年後に約3倍濃度に達する。なお、毎年1%増加のシナリオは、単純であるため、気候モデルの性能を比較する目的で良く使用されていた。ちなみに、無対策シナリオBAU (Business as Usual) として有名なIS92.aシナリオは、毎年約0.7%程度の増加率で、約100年後に現状濃度の2倍に達し、濃度増加は若干遅い。

予測結果

大気モデルの計算時間間隔 t=20分として、125年間の温暖化予測計算を行った。計算時間は、NEC SX-4/32CPUで、1年間では約100分、125年間では約200時間 (約9日間) であった。数値出力データの合計は170GBに達し、当時のスーパーコンピュータの技術水準では計算時間、出力量とも記録的な数値である。ちなみに、この結合モデルを構成する大気モデルの空間分解能は約300kmであり、2001年時点においても世界で最も高解像度の結合モデルの一つである。

さて、図3-1-3は、全球平均地表気温の月平均値に関して、その125年間分の変化を示したものである。図には、年率1%増加シナリオに対する漸増計算の他に、NCARで実施されたCO₂濃度一定計算 (300年間の計算の一部) も示している。いずれも細い線が月平均値で、太い線は年間平均値 (12ヶ月の移動平均) である。両

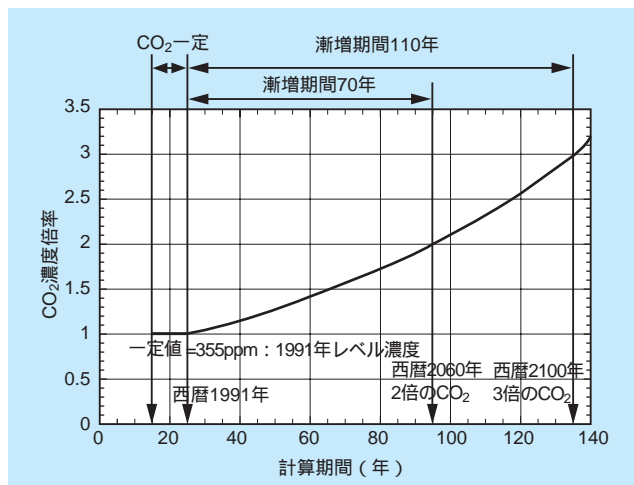


図3-1-2 予測に用いた大気中CO₂濃度シナリオ

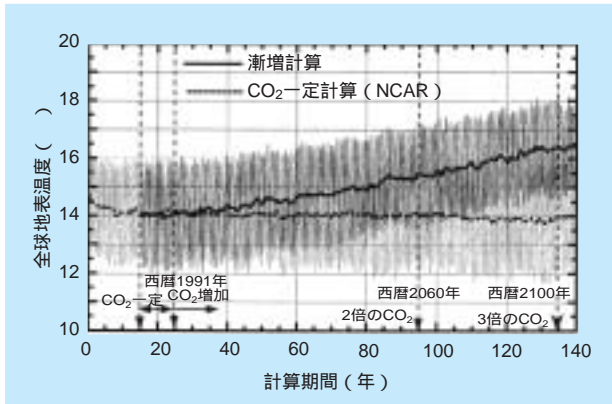


図3-1-3 全球地表気温（月平均）の予測結果

者の差がCO₂増加による気温上昇である。図から、CO₂濃度が2倍になる2060年頃では約1.5℃、3倍濃度になる2100年頃では約2.3℃、全球気温が上昇する。大気中のCO₂増加速度と気温上昇には密接な関係がある（IPCC第二次評価書（1995年）参照）。この予測は年率1%増加シナリオの結果で、BAUシナリオ（IS92.a）より増加する速度が大きく、濃度2倍時と比較すると、温度上昇はBAUに比べて低く予想される（後述の図3-1-6の結果と比較されたい）。つまり、温暖化現象では、CO₂濃度の増加する速度も重要である点に注意が必要である。

図3-1-4は、CO₂倍増時の気温上昇量の空間分布である。この図のように、気温上昇は全球一様ではなく、北

半球ではグリーンランド、ベーリング海周辺、南半球では南極周辺の気温上昇が大きい。これは、温暖化によって海水が融解することが影響している。

図3-1-5は、南北両半球の海水体積の変化を示したものである。細線は1日毎の変化を示し、太線は年間平均値である。北半球の海水体積は、20年前後の周期的な変動を示しながら、徐々に減少していくことがわかる。両半球とも、CO₂濃度が2倍になると、現状の約80%まで減少し、3倍濃度時では約50%まで減少すると予測された。ただし、これは海水の融解なので、これにより海面が上昇することはない。ちなみに、海面上昇に関係するのは、南極、グリーンランドにおける淡水起源の

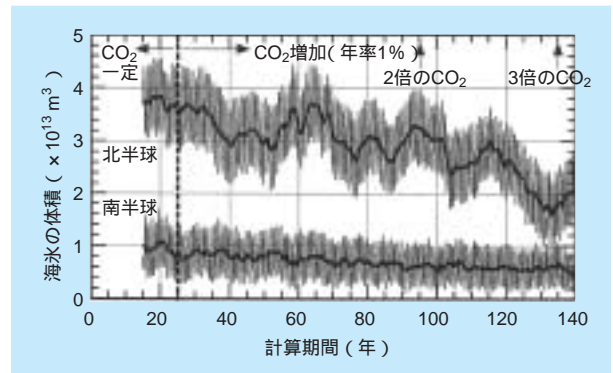


図3-1-5 南北両半球の海水の融解

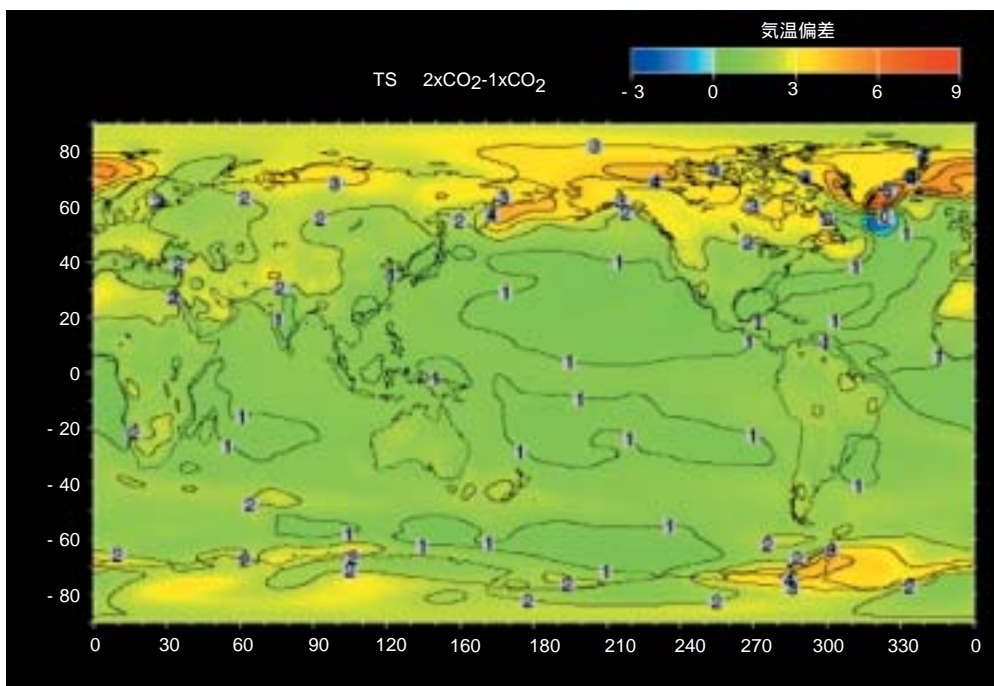


図3-1-4 温暖化時の地表気温の分布（濃度倍増時）

氷床の融解である。

この他に、全球の降水量は、CO₂濃度倍増時では約2.3%、3倍時では約3.8%増加すると予測された。また、海洋の中深層の海流は全般的に減少する傾向にあり、グリーンランド周辺から南下する水深約3,000mの流れ（熱塩循環）の衰退が顕著である。ただし、この予測では、海洋の熱塩循環が停止するまでには至っていない。

なお、この結果は、3-2節の地域規模の気候変化、3-3節の地域海洋の変化、3-4節の台風の変化の各予測において、境界条件として使用されている。

3-1-3 20世紀/21世紀プロジェクト

より現実的なCO₂濃度シナリオについての温暖化予測は、当所が参加した国際共同研究ACACIAの20世紀/21世紀プロジェクトとして実施された（1998年、詳細は本節のコラム4参照）。

その結果を図3-1-6に示す。この予測では、21世紀のCO₂濃度シナリオとして2種類を想定している。一つは、CO₂削減などの特段の対策をとらないBAUシナリオで、IPCCが1992年に作成したIS92.aをベースにしている。もう一つは、産業革命以前の濃度280ppmの約2倍である550ppmに濃度を安定化するWRE550安定化シナリオ（Wigley et al.,1996）である。ちなみに、BAUシナリオ

では、2100年時点の濃度は1990年の約2倍の710ppmとなる。なお、大気中のSO₂は寒冷化をもたらすが、IS92.aでは排出量が非現実的に過大評価されているため、下方修正してある。

使用された結合モデルは、125年間予測に用いたNCAR-CSMの改良版であるが基本的には同じで、フラックス調整を必要としないことが特徴である。これは、図のCO₂濃度一定計算において、気温が一定して安定していることから、その効果を確かめることができる。全球気温の観測値は、19世紀中ごろから1990年までの間に約0.5 上昇した。気候モデルは、この気温上昇を良く再現できるが、1940年の前後約20年間については観測値の上昇を再現できず、モデルの信頼性に依然問題が残されている。

21世紀の予測結果では、BAUシナリオでは1990年比で気温が約2 上昇、WRE550安定化シナリオでは約1.5 の上昇と予測され、CO₂濃度を550ppmに安定化させるとその効果は約0.5 程度と予測される。550ppmに濃度を安定化するには、相当大幅な排出削減が必要となるが、それが地球温暖化の防止におよぼす効果は意外に小さいとも言える。しかしながら、濃度安定化レベルと温暖化防止効果の関係については、台風等の異常気候の変化も含めた高信頼度の予測が不可欠であり、今後の重要な課題である。

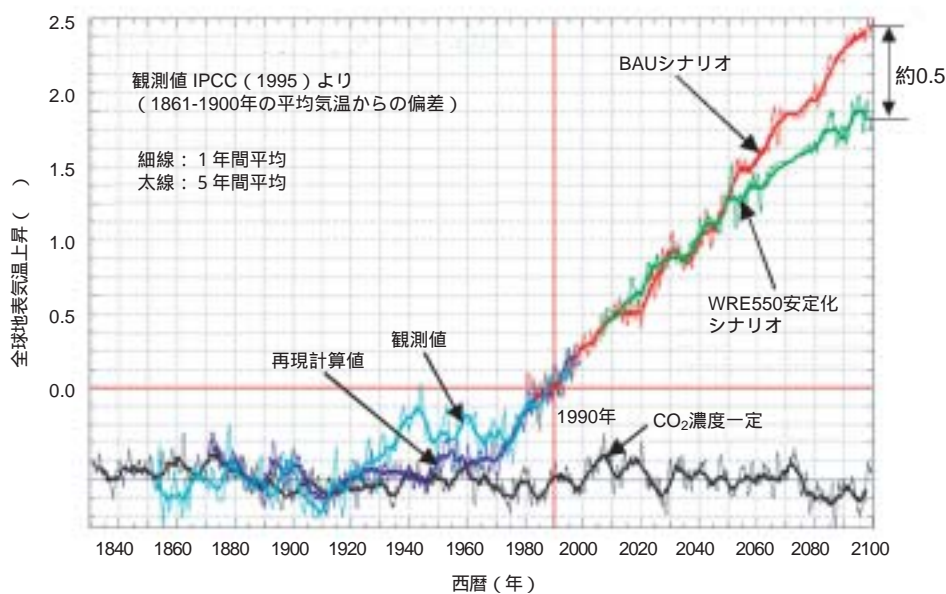


図3-1-6 20世紀の気温再現計算と21世紀の温暖化予測（国際共同研究ACACIA成果）

コラム4：CO₂排出量から大気中濃度の推定

CO₂排出量から大気中CO₂濃度を推定する、あるいは逆に、濃度から排出量を推定する主なモデルには2種類ある(Wigley ; 1993, Joos et al., 1996)。当所の温暖化予測では、Wigley (1993) のモデルを用いている。

推定方法の概要

ある時点(t)の大気中CO₂濃度をC(t)とすると、次式が成立する。

$$2.123dC(t)/dt = \text{排出量} - \text{吸収量} = I + D_n - F - X$$

ここで、濃度C(t)の単位はppmである。Iは化石燃料、セメント製造からの排出量、D_nは土地利用変化(森林破壊等)による正味の排出量である。また、Fは海洋の吸収量、Xは陸上植生による吸収量である。排出量、吸収量の単位はGtC/year(炭素換算で年間10億トン)である。植物吸収量の推定では、CO₂の増加とともに吸収量が増加する効果(施肥効果)や森林の再成長を考慮していることが特徴である。

観測データとの比較

図1に、CO₂濃度推定モデルによる大気中濃度計算結果(1765年~2000年)と観測データとの比較を示す。モデルでは、1990年以前のデータはパラメータ調整に用いているので、観測データとの比較は意味がない。1991年以降では、観測データの平均増加率約1.5ppm/year、計算値約1.8ppm/yearと相違があるが、全体の傾向は良く一致している。

問題点

このモデルでは、CO₂海洋吸収量の推定に無機炭素は考慮しているが、有機炭素(2-2節参照)は考慮していないこと、海洋吸収量を過大に評価するなどの問題点がある。

また、このモデルでは、1980年代に行われた熱帯雨林などの森林破壊による排出量D_n(1980s)の不確実性が、大気中CO₂濃度の推定におよぼす影響が非常に大きい。例えば、2100年で見ると、D_nの上位、下位推定値に対応するCO₂の大気中濃度推定幅は約70ppmにも達する。

京都議定書の大気安定化効果の試算

図2は、京都議定書にしたがって、先進国が2010年に1990年排出量の5%を削減した場合(シ

ナリオ1)、さらに2020年に先進国が25%~75%までの大幅な削減を行った場合(シナリオ2~4)の大気中濃度を試算した結果である。図によれば、先進国の削減だけでは大気中濃度の安定化は極めて難しいことがわかる。これは、途上国の排出量が増加するためである。

今後の課題

国連気候変動枠組み条約(UNFCCC)の究極の目標は、「気候システムに対して、“危険”な人為的干渉を与えないレベルで温室効果ガス濃度を安定化させること」、である。濃度推定モデルは、排出削減が大気中濃度の安定化に及ぼす効果を推定する極めて重要な手法であり、今後その信頼性向上が大きな課題である。当所では、2001年度から、海洋および森林によるCO₂吸収量の推定精度の向上のため、研究を本格的に開始したところである。

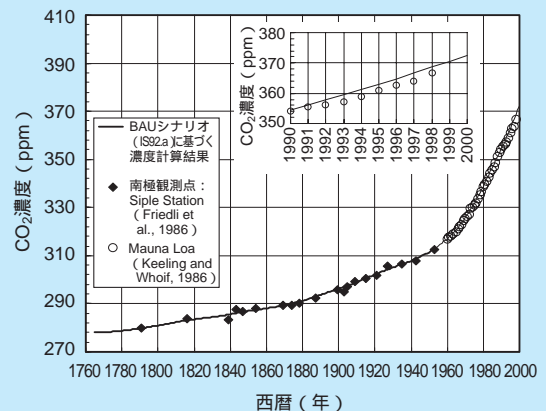


図1 CO₂大気中濃度と観測データの比較

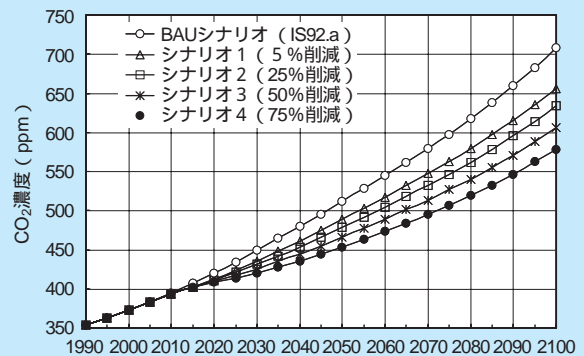


図2 CO₂排出削減の濃度安定化効果の試算

コラム5：ACACIA プロジェクト『21世紀の気候変化予測』

ACACIA (A Consortium for the Application of Climate Impact Assessment ; 気候影響評価応用のためのコンソーシアム) は、その前身である MECCA (Model Evaluation Consortium for Climate Assessment ; 気候影響評価のためのモデル評価コンソーシアム) を引き継ぐ国際研究プログラムとして、当所の他、EPRI (米)、KEMA (蘭)、NCAR (米) がコアメンバー となって1996年1月に発足した (2000年12月まで)。世界の研究機関や研究者が単独では取り組むことが困難な気候変化に関わる特定の問題に焦点を当て、最新の気候モデルGCMを用いて気候変化とその影響を評価することが目的である。

その代表的な研究プロジェクトが『21世紀の気候と環境の変化』である。

これは、世界最先端の気候予測のための大気海洋結合モデル (NCAR-CSM) を用いて、2100年の大気中CO₂濃度が710ppmになる無対策シナリオ (BAU) と、現状の1.5倍 (産業革命前の約2倍) の550ppmに安定させたときの気候変化をシミュレーションし、気候安定化効果を比較・評価するものである (図1)。気候予測のための結合モデル (NCAR-CSM) は、温室効果ガス (6種) と冷却効果を持つ硫黄化合物の化学と輸送を模擬できるアルゴリズムを持ち、ドリフトを避けるための「フラックス調整」の必要がないなど、従来の気候モデルには見られない多くのユニークな特徴を持っている。

IPCC第二次評価書では、エネルギー (化石燃料) 消費の増大によって大量のSO₂が排出され、大気中で形成された大量の硫酸エアロゾルの冷却効果によって温暖化が一部相殺される、というシナリオが主流だったが、ACACIAでは1992年のIPCCシナリオとは異なり、中国等の途上国においても酸性雨や大気汚染防止対策の導入を考慮した21世紀の現実的なSO₂排出シナリオが設定された。

シミュレーションの結果は図3-1-6に示す通りであり、1990年から2100年の間で、地上気温はBAUでは2.5、安定化ケースでは2.0 上昇する。即ち、

安定化ケースはBAUに比べ2100年の気温を0.5低下させる効果があることがわかった。また、降水量は地域によって異なるが、全体としては数%~10%増加すると予想された。

これらのシミュレーション結果は、GCMによるエネルギー削減シナリオ評価に弾みをつけた。また、結果およびSO₂排出シナリオはIPCC第三次評価報告書に採用され、政策決定者・気候研究者から高い評価を得た。

当所は、地域気候モデルの境界条件やエネルギー・シナリオの検討・評価に利用すると共に、人間の健康、水資源、農業、自然生態系および経済、等に対する将来起こり得る影響を分析・評価する際の有力な情報として、活用する予定である。

なお、NCAR-CSMは、本文で述べたように、現在もNCARによって改良研究 (第2世代結合モデル) が鋭意継続されており、当所は適宜、当所のスパコン (VPP5000) への移植を行っている。数年以内に気候の変動性の再現性向上を目指した温暖化予測計算を行う予定である。

また、ACACIAは気候研究をリードするその分野の第一線研究者によるエキスパート・ワークショップを企画し、これまで、急激な気候変動をもたらす恐れのある「熱塩循環」(1999.11) や「降雨の極値」(2001.4) に関するワークショップを開催した。

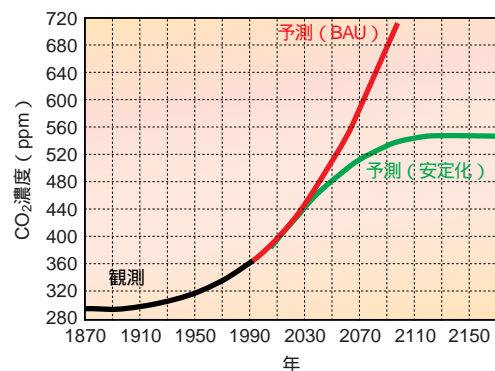


図1 CO₂排出シナリオ (ACACIA, 1998)

3 - 2 地域規模の気候変化

3-2-1 地域規模の気候変化を予測する手法

前節で述べたように、気候の変化を予測するには全球気候モデルが有用である。しかし、現在の段階では全球気候モデルの水平解像度は200～300km程度にしか過ぎないため、温暖化に伴う気候変化が自然環境や生態系、社会などに与える影響を評価する場合には入力情報としては不十分である。わが国における影響評価を考えた場合、少なくとも数10kmのスケールの情報が必要とされる。現在、スーパーコンピューターの発達に伴い、より高解像度の全球気候モデルによる予測を行う研究は着々と進められているが、その完成を待ってから影響評価を行い、対策を考えていたのでは間に合わないことが懸念される。そこで、粗い解像度の全球気候モデルの情報から、より詳細な地域情報を取り出す手法が検討されてきた。このような手法のことをダウンスケーリングと呼ぶ。ダウンスケーリングは統計的な手法（以下Stat-DS）および全球モデルと同様な物理モデルである地域気候モデル（以下RegCM）を用いた方法の2つに分けられる。

統計ダウンスケーリング（Stat-DS）

冬季における地上の寒さの指標として、天気予報では例えば輪島上空の5,500mの気温を用いることがある。すなわち、ある時刻の上空の気温と、同時刻（あるいは数時間後）における地上の観測地点の気温との間に何らかの統計的な関係があれば、上空の気温がわかっている場合に地上の気温を推定することができる。Stat-DSはこのような原理に基づき、一般に多変量解析法と呼ばれる統計手法を用いて構築される。図3-2-1には当所が開発した手法の概念図を示す。この場合、上空の気温の分布は比較的一様であるので、全球気候モデルの粗い解像度のデータでも地上の気温の予測には十分利用できる。

地域気候モデル（RegCM）

RegCMは全球気候モデルと同じ物理モデル（数値モデル）であるが、水平解像度はさらに細かく、一般に数10～100km程度になっている。この手法では、特定の地域（例えば東アジア）を対象としたRegCMが全球気候モデルの中にはめ込まれ、全球気候モデルで計算された粗い解像度の情報をRegCMの側方および下方から入力してやり、その特定地域の気象要素を更に高解像度で

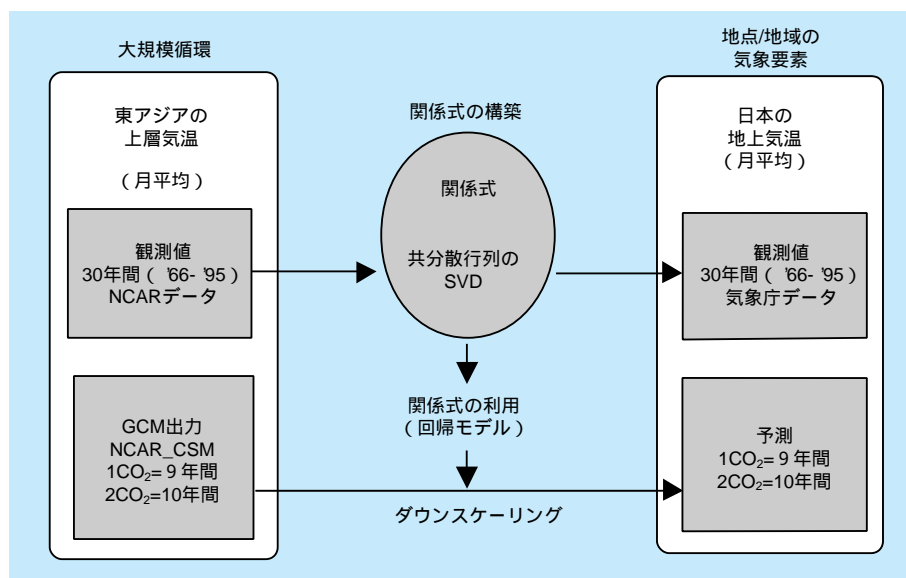


図3-2-1 統計ダウンスケーリング手法を用いた気候変化予測手法の概念図
観測値から得られる上層と地上気温の関係式を利用し、全球気候モデルの出力結果を地域レベルの情報に翻訳する。

計算するものである（図3-2-2）。この手法は現在の天気予報に用いられている手法と基本的には変わらないが、地球温暖化の予測といった長期的な計算のためには気候状態を正しく再現することができるような様々な工夫がなされている。

Stat-DSは過去の気象観測データがあればRegCMのように多大な計算機資源を必要としないことから、比較的に利用しやすいが、物理的な変動メカニズムは別途解析によって明らかにする必要があり、また、将来の統計的な母集団が過去の母集団から大きく逸脱しないという前提に成り立っている点に弱点がある。一方RegCMはこうした制約はないものの、計算機資源の制約から解析の例は限られてくる。このように両手法には長所・短所があるため、相互補完しながら適用することが必要である。

3-2-2 統計ダウンスケーリングを用いた気候変化予測

当所では上空の気温から地上の観測地点の気温を推定するStat-DSを開発した。この手法では、東アジア地域の上空3高度（500hPa、700hPa、850hPa：地上高度に直してそれぞれ約5,500m、3,000m、1,500m）の気温分布パターンからわが国の地上気温分布パターンを求めるもので、多変量解析手法を用いた回帰を利用している。

1月の月平均気温に関する手法を検証するため、過去20年間のデータを用いて上空と地上気温の関係式を構築し、それに続く10年間の地上気温を上空の気温から推定した。推定値と観測結果との比較によれば、各年を推定した推定誤差の平均（RMSE）は年々変動の大きい北海道の一部を除いて1程度程度の値であった。

本手法では関係式の構築に必要なデータ期間がまだ限られていることから、今後、利用できる観測データの期間が増えれば、誤差はより少なくなるとみられる。また、夏季の気温では、冬季よりも誤差が大きくなる傾向にあったが、これは地上の気温が上層の気温のみならず、周辺海域の海面水温などに大きく左右されることも関係しており、今後、関係式の構築にあたってはこうした様々な気候要素も取り入れていく必要があると考えられる。

降水量の変動メカニズムはさらに複雑なため、降水現象をその類似性に基づくいくつかのパターンに分けて、予測の体系化を図る試みもなされているが、気温に比べて精度はまだ十分ではなく、更に多くの気候要素を取り込んだ検討が必要である。

3-2-3 地域気候モデルを用いた気候変化予測

当所はNCAR（米国大気研究センター）との共同研究においてRegCMの開発を行ってきた。計算で用いた

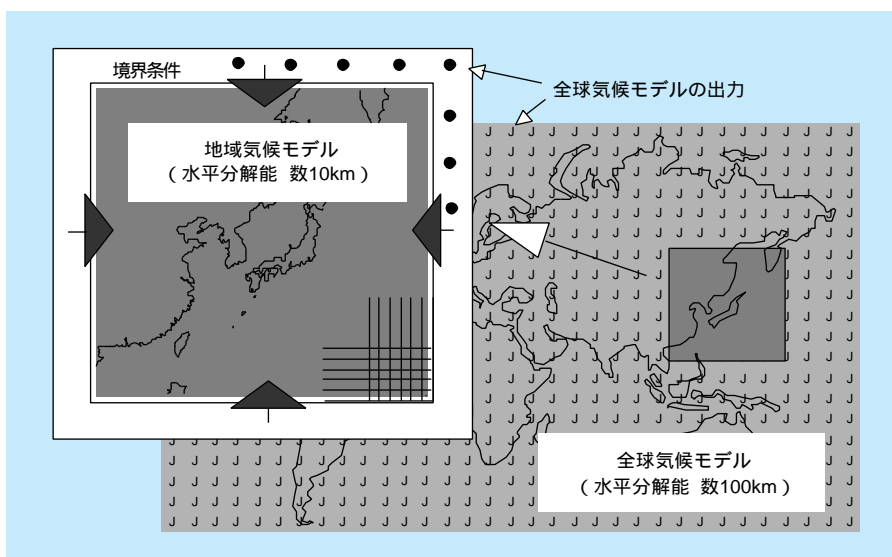


図3-2-2 地域気候モデルを用いた気候変化予測手法の概念図

粗い解像度の全球気候モデルの出力結果を側方境界条件として特定地域の気候変数の分布を高解像度の地域気候モデルにより計算する。

モデルはNCAR-RegCMバージョン2.5および3.0であり、東アジアの東西約5000km、南北約5000kmを対照として水平解像度は50km、鉛直14層で構築されている。RegCMを用いた気候変化予測を行う場合、まず、全球気候モデル/RegCMの結合計算において現在の気候変化を正しく再現できるかを検討しておく必要がある。図3-2-3にはRegCMで計算された1月の10年平均降水量を全球気候モデルで計算された結果の直接的な内挿結果と比較して示している。冬季の季節風に伴って生じる日本海側の降水量がRegCMでは明瞭に再現されている。一方、夏季の特徴である梅雨前線についても全球気候モデルではあまり明瞭に再現されないものの、RegCMでは日本付近の気流の収束に伴う降水帯が再現されており、その有用性が示されている。

RegCMを用いた気候変化予測実験用に、前節で示さ

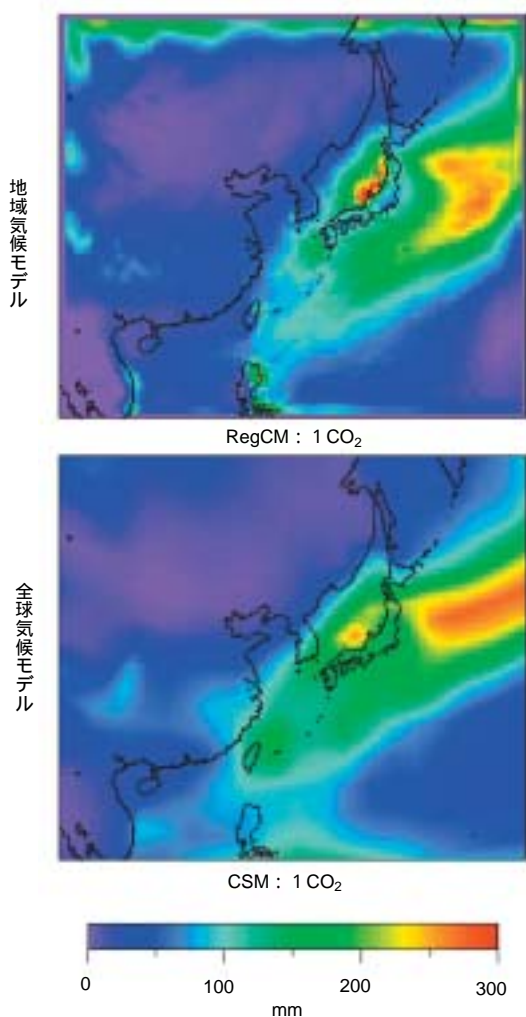


図3-2-3 地域気候モデルおよび全球気候モデルにより計算された現状の1月の降水量の比較

れたNCAR-CSMのCO₂漸増実験結果を利用した。図3-2-4にはCO₂倍増に伴う6月の降水量変化が地域気候モデルによる計算結果と、全球モデルの内挿結果で比較されている。一般に海面気圧、気温などの要素については全球モデルの結果とRegCMの概略的な分布パターンはそれほど差がない。ところが、この例のように、降水量については前線帯の再現性が異なっていたり、細かい解像度で示された地形の影響が、地域気候モデルでのみ良く再現されたりするため、季節的にはパターンに大きく差が見られ、地域によっては全球モデルとRegCMで増減傾向さえも異なる。

図3-2-5にはわが国の4つの地域（北海道、北陸、関東、九州）を対象とした計算結果をまとめて示す。今回用いた全球気候モデルの結果が地域レベルの再現または予測計算を行うにはまだ十分ではなかったため、地域、季節によっては再現計算にまだ誤差が見られた。従って、

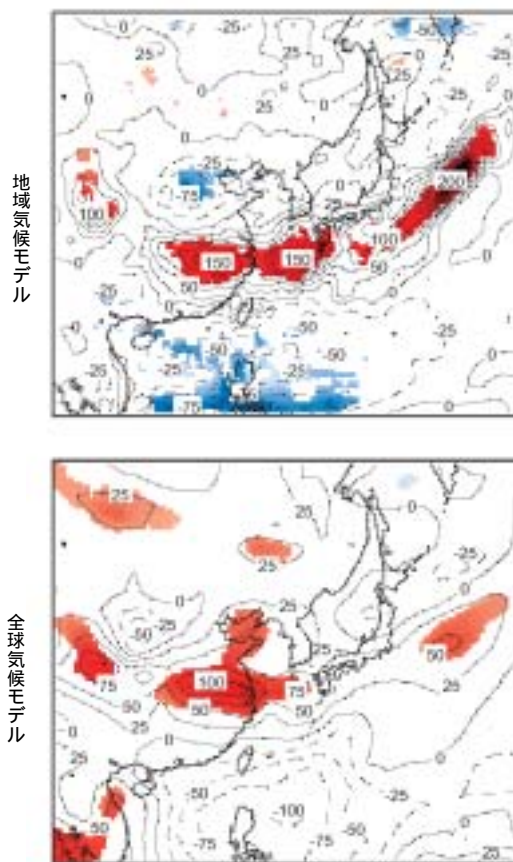


図3-2-4 地球気候モデルおよび全球気候モデルにより計算されたCO₂倍増に伴う6月の降水量の変化の比較
変化が統計的に有意な地域のみ赤(増加)青(減少)のカラーで表示。

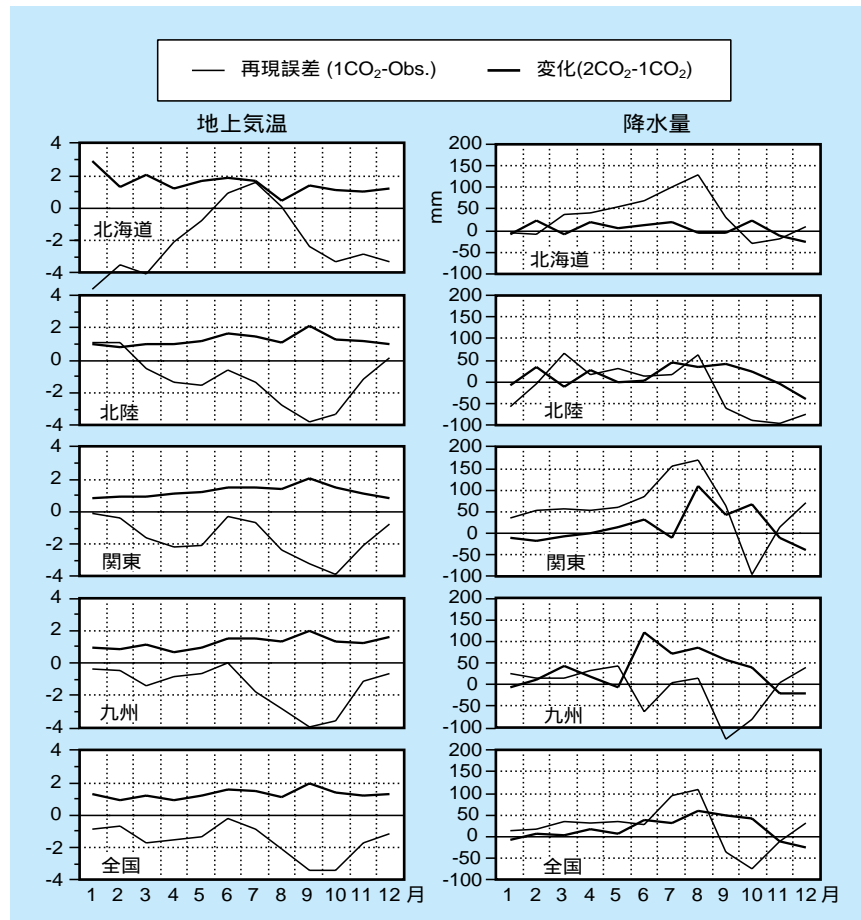


図3-2-5 わが国の4つの気候地域における月平均気温(左図)、月降水量(右図)の再現誤差(細線)およびCO₂増に伴う変化(太線)の季節性
黒丸(白丸)は1%(5%)の水準でCO₂増に伴う変化が統計的に有意であることを示す。最下段の図はわが国の全国平均値に対する結果

地域気候変化予測結果としての妥当性を評価する段階に至るにはまだ時間がかかるが、北海道の冬季の気候上昇を除けば気温の上昇は夏季に有意であること、気温の変化傾向は降水量の変化傾向に比べて比較的顕著であることなどは系統だった傾向として示されている。これらを含めて結果には興味深い点もあり、今後の予測実験との比較で検証が望まれる。

3-2-4 手法の比較

全球気候モデルの結果をStat-DS、およびRegCMでダウンスケーリングした結果を図3-2-6に比較して示している。ここでは1月の月平均気温に関する現状の全国平均値の再現結果(9年間)とCO₂が現状の2倍に増加した時(10年間)の結果を例として示している。現状、CO₂増時ともRegCMの相対的な低温傾向を除けば、

年々変動は両手法で良く一致した。RegCMの低温傾向は全球気候モデルにおける海氷領域の過大評価がRegCMでのみ強く反映されていることなどが原因である。

7月の気温の再現・予測結果は1月より両手法の差が大きかったが、これは地上気温を支配する要素が夏季にはより複雑であるためである。今後、RegCM結果との比較検討を通じて変動メカニズムと支配要因(気候要素)を明らかにし、例えば、海面温度などの要素の追加などによりStat-DSはより改善されると見られる。

地球温暖化の影響評価を行うにあたって、地域レベルでの気候変化予測情報が必要であり、これらのダウンスケーリング手法の開発は重要である。しかし、今後、最も重要なのは最終的な結果を左右する全球気候モデルの気候再現精度をより向上させることである。

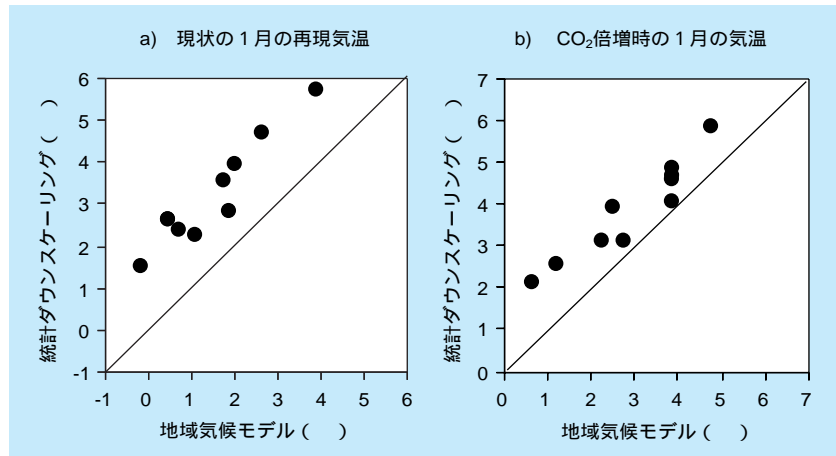


図3-2-6 NCAR-CSMの出力結果に対し、地域気候モデルと統計ダウンスケーリング手法を用いて得られた結果の比較

- a) 現状の1月の日本の地上平均気温(9年分)の再現結果
- b) CO₂倍増時の1月の日本の地上気温の予測結果(10年分)

コラム6：エアロゾルの気候影響

エアロゾルによって引き起こされる人為的な気候変化が社会的な関心を集めている。エアロゾルとは、大気中に懸濁している液体または固体の微粒子の総称であり、その地理的な分布が非一様だけでなく、化学組成および粒径分布が非常に多様という特徴がある。エアロゾルの気候影響に関して、最近、多くの知見が蓄積されつつあり、IPCCの最新レポート『気候変化2001』でも、主要な課題のひとつとして取り上げられているが、まだ不確定な部分も多い。

東アジアは、ヨーロッパ、北アメリカ東部と並んで二酸化硫黄（ SO_2 ）の人為的な排出量が多い地域であり、結果として、硫酸塩（ SO_4^{2-} ）エアロゾルも多く存在している。21世紀の東アジアにおける気候変化を予測するためには、硫酸塩エアロゾルの放射効果を、気候変化の予測モデルに取り入れる必要がある。硫酸塩エアロゾルの放射効果には、

直接放射効果（エアロゾル自体が太陽放射を散乱する効果）

間接放射効果（雲凝結核としてはたらい、雲の放射特性を変える効果）

の2種類がある。

当所では、硫酸塩エアロゾルの直接放射効果を考慮した地域気候モデルを開発してきた。さらに、このモデルを用いて、現状のエアロゾル気柱量（図1）を4倍した感度実験を行った。東アジアの地上気温低下を見積もったところ（図2）、硫酸塩気柱量が大きい中国大陸の工業地帯を中心として、地表面での下向き放射量の減少による、比較的大きな地上気温低下が認められた。

今後、硫酸塩エアロゾルが地域気候に及ぼす放射影響をより正確に見積もるためには、直接放射効果のみならず、間接放射効果をも含めた総合的な評価が必要となる。また、東アジアにおける将来の気候変化は、二酸化硫黄の排出量に依存するので、できるかぎり現実的な排出シナリオを用いて予測しなければならない。

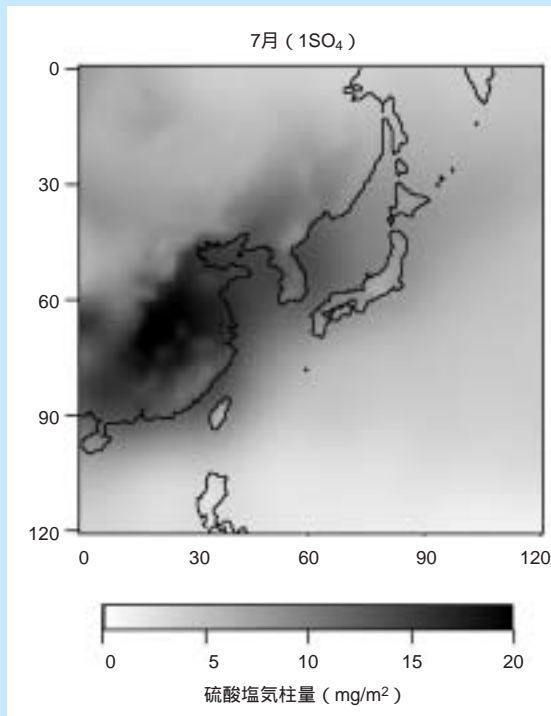


図1 NCARの硫酸塩化学モデルを用いて再現された、夏期（7月）の東アジアにおける硫酸塩気柱量

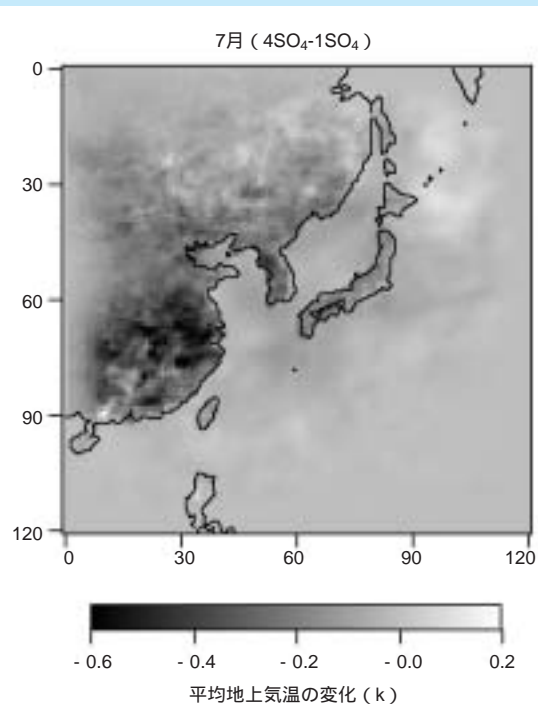


図2 地球気候モデルにより計算された、硫酸塩気柱量を4倍増したときの平均地上気温の変化

コラム7：地球温暖化のエネルギー分野への影響

[産業・エネルギーへの影響]

産業活動は気象の変化に敏感であり、エネルギー需要もそれに応じて常に変動している。

一般に、気温が上昇すると、空調用の電力需要が増え、給湯用のガス需要が減る。6～8月の平均気温が1℃上昇すると、夏物商品の消費が約5%増加する。夏季の電力需要の40%は冷房需要であり、気温が1℃上昇すると電力需要は約500万kW（一般家庭の160万世帯分）増加する。また、降水パターン（降水量・強度・時期、継続時間）の変化は産業・農業・民生などにおける用水の利用形態に影響を及ぼす。

温暖化により、エネルギー消費構造が変化し、遂には産業構造の変化に波及するのは避けられない。

高温期の長期化は夏物商品の消費増をもたらし、その結果、夏物商品を扱う電機・食品・衣料メーカー等の生産体制が強化され、電力需要が増加する。さらには、健康被害や罹患率が増加し、少子高齢化社会と相俟って、社会全体の労働供給力の低下も考えられ、生産性を保障する社会基盤も揺るがしかねない。

異常渇水は生活用水に影響し、工業用水依存型業種における給水制限による減産や操業停止をもたらす。特に、産業・民生・農業用水等の水・電力需要が最多となる夏季の渇水の継続は、晴天・高温の継続をも意味し、冷房用電力需要にも拍車がかかるだろう。

サービス経済化の進展、情報通信社会の形成、快適指向の高まり、電力料金の値下等を反映して、エネルギーの電力シフトは今後も続くと考えられる。省エネとともに非化石エネルギーが増えない限り、発電に伴うCO₂排出量は増加する。

温暖化は、電力供給にも様々な影響を及ぼす。降水量や積雪量の変化は水力発電に大きな影響を与える。火力・原子力発電所の発電効率は冷却水温度に依存するため、冷却水温が1℃上昇すると火力で0.2～0.4%、原子力で1～2%の発電出力が低下する。雷、雪氷、塩害などの架空送電線に対する影響も考えられる。

[産業・エネルギーの適応策]

わが国のエネルギー・産業分野は、ハード・ソフト両面で安全係数の考慮やセーフティ・ネットにより、一般には気候平均値の変化であれば影響は軽微であると考えられる。他方、温暖化によって、過酷・突発的・予期せぬ事象等、極値の増加や不可逆的事象の発生による深刻な災害（リスク）が懸念される。図1に示すように、気温の出現頻度分布は分散（変動成分）が大きく変化する可能性がある。分散の拡大やシフトは、極値の増加や継続時間の長期化を意味する。しかし、現状では予測が困難なため、このような極値の発生（質・量・可能性など）に関する予測手法を確立し、現行システムが極値の変化に対しどこまで耐えられるか、そのリスクを評価し、リスクを克服するための長期戦略が必要であろう。それによって、温暖化のリスクを軽減・回避するための技術開発・システム設計が進む。

また、異常気象（猛暑・冷夏・大雨等）の影響を回避する保険システムとして「天候デリバティブ」の導入も加速するであろう。

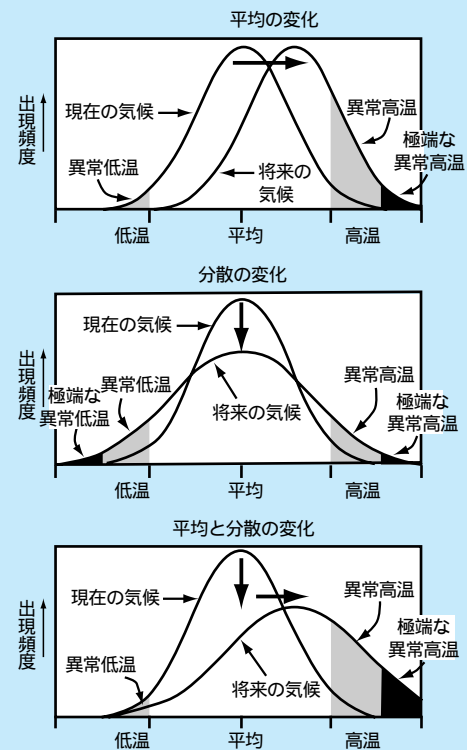


図1 予想される気温の出現頻度の変化
(IPCC TAR WGIIの報告書より作成)

3 - 3 地域海洋の変化

3-3-1 温暖化と海洋環境

地球温暖化が海洋に及ぼす影響としては、気温の上昇、海上風や降雨の変化、陸上からの淡水供給や海水分布の変化などに伴う、海水温の上昇、海流の変化、海面上昇、塩分の変化等が考えられる。海面上昇は、沿岸域での構造物の水没や氾濫、自然環境の破壊等をもたらす可能性があり、特にさんご礁やマングローブ等によって沿岸線が形成される地域では、温暖化に対する脆弱性を評価する上で重要な要素となる。海流や水温、塩分等の変化は、水産資源の分布や海洋の一次生産量等に影響を与えるものと考えられる。さらに、沿岸域や内湾での流動の変化や水温の上昇は、水質の悪化等を引き起こす可能性がある。また、海水温等の変化は海面からの水蒸気の供給量を変化させるため、台風の頻度や規模、日本周辺では降雨量や降雪量を変化させるものと考えられる。特に、日本海では、海面からの蒸発散量は冬季の降雪量等を左右するものであり、その水平循環や鉛直循環の変化による熱量バランス等の変化に対する検討も必要である。

3-3-2 全球温暖化予測と地域海洋モデル

全球規模の温暖化については、全球大気・海洋結合モデルを用いた計算が行われており、気温上昇等の種々の現象が予測されている。しかしながら、全球結合モデルでは、計算時間等の制約からモデルの解像度が粗く、局所的な環境変化を予測するには不十分である。また、海洋では、温暖化の影響について局所的な検討を行う手法は確立されておらず、海水温の上昇や黒潮の流軸の変化など、日本周辺の海洋環境変化を詳細に検討するためには、高解像度の地域海洋モデルを用いた予測手法の開発が必要である。

地域規模の計算としては、例えば、Smith, R.D.ら(2000)はPOP(Parallel Ocean Program: 米国 Los Alamos National Lab.で開発された海洋モデル)を用いて湾流等の北大西洋の流動を高解像度で計算している。日本周辺の海域では、Kagimoto, T.ら(1997)が、

POM(Princeton Ocean Model: 米国 Princeton 大学で開発された海洋モデル)を用いて黒潮の流動等の計算を行っている。また、日本海については、Kim, C.-H.ら(1996)がMOM(Modular Ocean Model: 米国 NOAA/GFDL(Geophysical Fluid Dynamics Lab.))で開発された海洋モデル)を用いて海流等の計算を行っている。これらの計算は、主として現在の海洋環境を対象としたものであり、全球規模の温暖化予測結果等と組み合わせた将来的な予測はほとんど行われていない。

当所が開発した地域海洋モデルは、計算領域に開境界が存在する場合でも、流速や水位の境界条件を容易に設定することができる。また、海底や側方境界条件の設定も容易であり、日本周辺のような水深が急激に変化する複雑な海域にも適用可能である。

3-3-3 日本周辺の海洋環境変化

第3-1節で示したNCAR/CSMによる温暖化予測結果を、この地域海洋モデルに適用し、局所的な海洋環境の変化について予測を行った。日本周辺の海洋環境は、黒潮の流動等広範囲な海域の影響を受けている。このため、西部北太平洋全体を対象として、南北: 20°S-65°N、東西: 90°E-180°Eの範囲で計算を行った(図3-3-1)。計算領域の水平方向の解像度は、計算時間等を考慮して全球結合モデルの3倍(2/3°×2/3°(約60km))とした。また、鉛直方向の解像度は、全球結合モデルと同様に45層とした。全球結合モデルでは、2°×2°と解像度が粗いため、フィリピンや朝鮮半島が省略されており、南シナ海や日本海が十分には再現されていない。今回の計算では、地形の再現性が流動特性に及ぼす影響をより詳細に検討するため、西部北太平洋や南シナ海、インド洋の一部を同時に計算した。

NCAR/CSMによる温暖化予測結果(図3-1-3)のうち、大気中のCO₂濃度が現状の2倍(全球平均値表面温度が1.5 上昇)、3倍(全球平均値表面温度が2.3 上昇)になった時点の予測結果を用いて、日本周辺の海洋環境の変化(年間平均値)を検討した結果、以下のことが明らかになった(図3-3-2)。

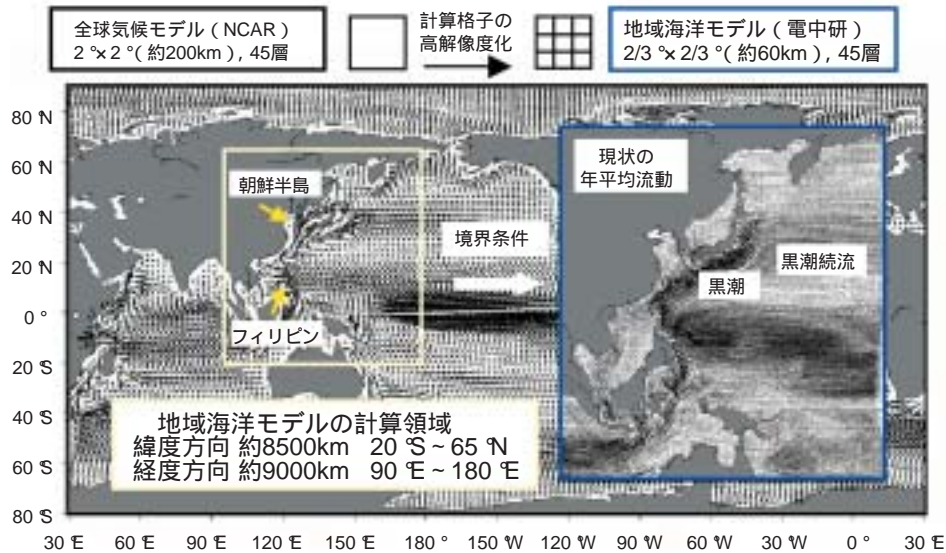


図3-3-1 地域海洋モデルの概要

- 1) 全球結合モデルでは、朝鮮半島やフィリピンが再現されていないため、特に日本海やインドネシア通過流等が過大評価になっている。地域海洋モデルでは、黒潮やその他海流とも観測値に近い値となり、日本周辺の流動の再現性は向上している。
- 2) 温暖化時には、流動の変化にとともない、力学的海面高度^{注1}が上昇する。特に黒潮流域にあたる太平洋側の影響が大きくなっている。
- 3) 太平洋域では、黒潮や黒潮続流などの流動が強化される。また、日本海においても、対馬暖流や日本海の流動は強化される傾向にある。逆に、インドネシア通過流の流量は減少する。

- 4) $3 \times \text{CO}_2$ 時には、日本周辺の年平均水温は約2℃上昇する。特に北海道東方沖の海域では昇温が大きく、黒潮続流の北上域や日本海の朝鮮半島東岸域の昇温が大きくなっている。

3-3-4 まとめ

全球結合モデルでは、計算時間等の制約により高解像度の計算格子を使うことは困難である。高解像度の地域海洋モデルを用いると流動計算の精度が向上し、より精度の高い海洋環境の変化の予測が可能である。今後は、大気温、海上風の季節変動や冬季の海水の影響を考慮できるように、モデルの高度化を図り、温暖化時の日本周辺の詳細な気候変化予測に適用する。

注1：海流などの流動に釣り合う海面高度で、流速の大きさや分布により変化する。温暖化時の水位上昇（熱膨張、陸氷・海水の融解など）では、通常考慮されていない。

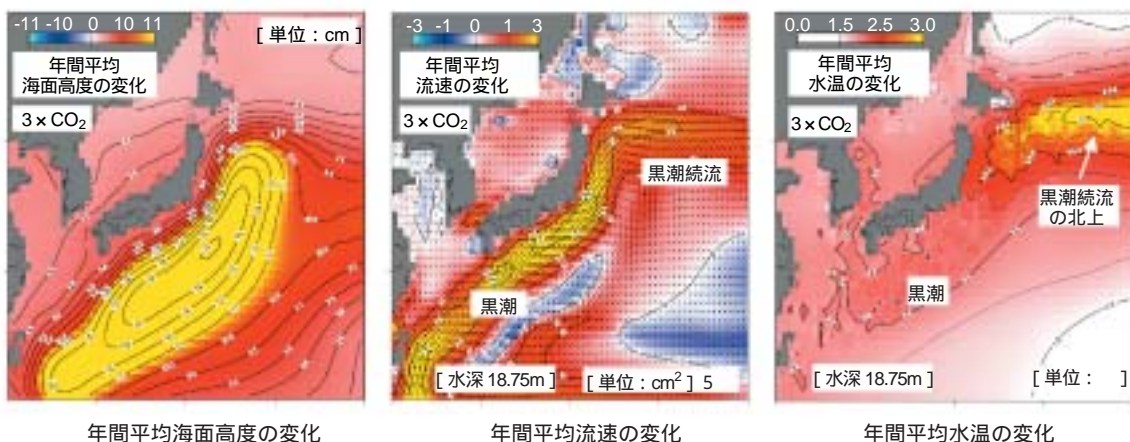


図3-3-2 温暖化時（ $3 \times \text{CO}_2$ ）の海洋環境変化

3 - 4 台風の変化

3-4-1 温暖化と台風の関係

台風^{注1}が人間社会におよぼす影響は極めて大きく、温暖化と台風の発生頻度や強度との関係に社会的関心が高まっている。温暖化による台風活動の変化を予測することは、観測データの蓄積期間が短いことや、数値気候モデルの精度が不十分であることから、現状では困難を伴う。2001年に発刊されたIPCC第三次レポート（コラム2参照）でも、将来の台風の変化については不明な点が多く、次のような数値モデルによる予測結果が紹介されるに留まっている。

- ・ 台風の存在する位置は変化しないが、地域的な台風の頻度には何らかの変化が生じる。ただし、その変化傾向は、予測に用いられる数値モデルによって結果が異なる。
- ・ 台風の最大強度は5%から10%増加し、台風に伴う降水強度は20%から30%増加する。

台風のエネルギー源は、暖かい海面から蒸発した水蒸気が、大気中で凝結する時に出す熱である。したがって、温暖化によって蒸発量が増えるのに伴い、台風頻度も増加するのではないかと懸念される。ところが、実際の台風発生には、海面水温の他に、気温・水蒸気の鉛直分布や大規模な風の三次元的な分布も関係しており、将来の台風の動向には総合的な評価が必要である。現在の気候モデルでは、特に全球規模の水の循環の表現精度が不十分であり、モデルによって予測結果が異なる一因と考えられる。

一方、台風強度の変化については、数値モデルの結果に加え、理論的考察からも増加傾向が示唆される。台風のエネルギー源である大気中の水蒸気は、気温が高いほど多く含むことができる。温暖化による台風強度の増加傾向は、水蒸気を介した海洋から大気への熱供給が、温

注1：熱帯低気圧の呼称は強度や発生海域によって異なり、台風もその一つとされるが、ここでは、台風を風速17.2m/s以上の熱帯低気圧全体を指す用語とする。

暖化によってより効率的に行われるためと解釈される。

3-4-2 NCAR CCM2 を用いたケーススタディ

目 的

温暖化による台風の変化については、特に台風頻度の変化に対して不確実な点が多い。仮に、将来、強大な台風の来襲頻度が増加するとすれば、社会・経済におよぼす影響は甚大である。中でも電気事業に対しては、電力施設の耐風・耐波浪設計基準や、ダム周辺域の異常出水に対する管理手法などに改善が求められることになる。このため、当所では、1994年以降、米国大気研究センター（NCAR）との共同研究により、温暖化と台風活動の関係について信頼性の高い将来予測を得ることを目的として、気候モデルを用いた数値シミュレーションによる研究を行ってきた。

数値モデル

ここでは、NCARのCCM2と呼ばれる全球大気モデルを用いた研究成果を述べる。CCM2の空間解像度は、水平約300km、鉛直18層である。現実の台風は、水平方向に1000km程度の広がりをもち、中心には10-100km程度の大きさの台風の眼がある。CCM2の解像度では、台風の中心付近の構造を表現することはできないが、前線のない渦としての台風の特徴は表現可能である。本研究では、モデルの台風として、北緯40度から南緯40度までの間に出現する低気圧のうち、中心気圧および気温の鉛直分布について一定の基準を満たすものとして定義している。したがって、モデルの台風には、中心付近の構造や強度について現実の台風とは異なる点があることに注意を要する。

計算条件

この研究では、現状およびCO₂濃度が現状の2倍となった気候の条件に対し、それぞれ8年間の数値シミュレーションを行った。温暖化気候の条件では、CO₂濃度に加えて、境界条件として与えられる海面水温について、

現状気候で用いた平年値データに、CO₂倍増時に予想される温度変化を加えたデータを用いた。この温度変化は、3-1で述べた大気・海洋結合モデルによるCO₂漸増シミュレーションから得られたもので、熱帯域では概ね1程度の昇温量である。

結 果

ここでは、台風の頻度を台風が存在した延べ日数で示すことにする。図3-4-1に計算格子毎に数えられた台風延べ日数を東西方向に合計したものを示す。温暖化しても台風が出現する緯度帯は変わらず、全球的な台風頻度にはほとんど変化が見られないことがわかる。

台風活動の変化が小さいという結果は、熱帯大気の気温および水蒸気の鉛直分布の変化と関連が深い。このモデルでは、温暖化によって対流圏上層でより大きな気温上昇が生じたが、それによる大気安定化の効果を打ち消すように、下層では水蒸気量が増加した。すなわち、湿潤大気に対する不安定度の変化は小さく、台風頻度が

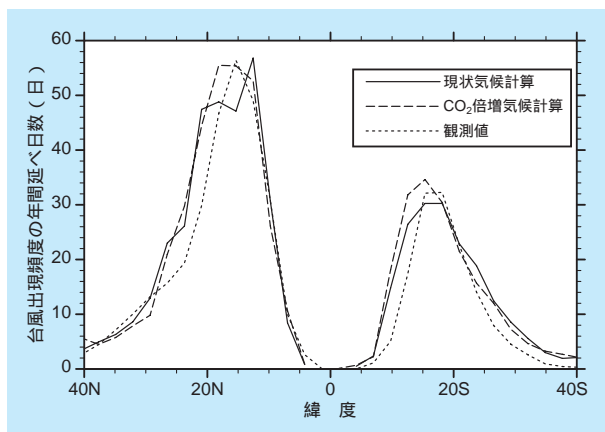


図3-4-1 台風の緯度別出現頻度

一定であったことと対応する。

表3-4-1に、台風海域別の年間延べ台風日数の変化をまとめる。温暖化の影響は海域によって異なり、北太平洋西部および南インド洋では増加傾向、北大西洋および北太平洋東部では減少傾向を示している。しかしながら、いずれの海域でも年々の変動が大きく、北大西洋における変化が90%の統計的有意水準を満たすのみである。

3-4-3 ま と め

定性的には、温暖化は台風の最大強度を増加させる効果がある。しかしながら、電力施設をはじめとして社会・経済に影響をおよぼす強い台風が、どこでどの程度増えるかといった情報については、現状では信頼できる予測は得られていない。この問題について、上記ケーススタディは決定的な結論を与えるものではないが、次の点については、ある程度の理解が得られたと言える。

- ・温暖化による海水温の上昇や水循環の強化は、必ずしも台風の活発化には寄与しない。
- ・地域的な台風の変化は、自然の気候変動の影響も大きく、一般的に、温暖化による変化の有意性はあまり高くない。

現在の数値モデルでは、水蒸気分布に関係する雲や対流の表現について改良の余地が多く残されている。また、信頼性の高い予測結果を得るには、台風の表現能力に直接関係するモデルの空間解像度を高めることも重要である。物理過程の改良や計算機性能の向上によるモデルの高解像度化は着実に進められており、今後の台風予測の精度向上が期待される。

表 3-4-1 台風の発生海域別の頻度変化

台風海域	現状気候 (A)	CO ₂ 倍増気候 (B)	(B-A)	信頼区間	
				90%	95%
北大西洋	88.6	76.4	- 12.2	± 11.1	± 13.5
北太平洋東部	48.8	44.4	- 4.4	± 5.1	± 6.2
北太平洋西部	171.4	189.4	18.0	± 19.6	± 23.8
北インド洋	11.6	13.4	1.8	± 2.8	± 3.5
南インド洋	33.3	41.4	8.1	± 8.3	± 10.1
南太平洋西部	131.5	130.3	- 1.2	± 12.3	± 14.9
全球	499.9	509.3	9.4	± 29.5	± 36.0

コラム 8 : 長期再解析プロジェクト

地球をとりまく大気の観測データは、時間的・空間的に均一ではなく、特に、大陸の奥地や地球表面の7割を占める海洋上ではデータが不足している。日々の気象観測データは、世界の主要な天気予報センターに配信され、空間的に一様なデータに変換するための解析手続きを経て、天気予報に使われている。観測データは、特に、大陸の奥地や地球表面の7割を占める海洋上で不足している。そこで、時間的・空間的に不均質な観測データから、気温や風速などの気象要素の全球分布を得るために、全球四次元データ同化（以下、単にデータ同化と記す）と呼ばれる数学的手法が開発されてきた。

データ同化は発展途上の技術であり、世界の主要な予報センターや研究機関では、天気予報精度の向上を目指して継続的に改良が行われている。そのため、天気予報の過程で蓄積された解析データには、データ同化手法の改良に伴う品質・特性の不連続性が避けられない。全球の気象解析データは、気象・気候研究にとって極めて有用な基盤データである。そこで、1990年代になって、ヨーロッパとアメリカの代表的な予報センターを中心として、過去の観測データを最新のデータ同化手法を用いて再び解析するという再解析プロジェクトが立ち上げられた。

再解析によって得られた成果（再解析データ）は、気象・気候研究の発展に大きく貢献してきた。温暖化予測などの気候変動研究においては、これまでの気候の推移を正確に把握するため、再解析

データが不可欠である。また、温暖化の予測に使われる気候モデルの開発にも再解析データが有用である。予測モデルが信頼できるものかどうかは、計算された気候状態がどの程度現実的であるかによって判断される。現実の大気には、様々な時間・空間スケールの変動があり、モデル大気の検証では、各種気象要素の平年値に加え、それらの変動性にも留意する必要がある。したがって、検証に用いる観測データとしては、少なくとも10年以上の期間にわたり、品質の一様な再解析データが望ましい。

これまでのところ、欧米の研究機関において表1に挙げられる再解析プロジェクトが実施されてきた。再解析研究には、膨大な人的・計算機資源を必要とするため、これを実行できる研究機関は非常に限られている。日本においても、最近になって独自の再解析を実施する気運が高まり、2001年度から当所と気象庁との共同研究を核として、大学等の研究者の参加を広く募り、全日本的な体制で長期再解析プロジェクトが開始された。前述のように、データ同化技術が発展途上であることから、既存の再解析データは、特に熱帯の海洋上において特性が大きく異なっている。日本が、これまでに蓄積された観測データを整備し、独自のデータ同化モデルを用いて、新たな再解析データを作成することは、国際的に大きな貢献となり得る。温暖化予測の信頼性を高めるためにも、日本初の長期再解析プロジェクトから得られる知見が大いに期待される。

表1 長期再解析プロジェクトの実施機関(同一の実施機関のプロジェクトについては、最新のもののみ掲載)

実施機関	解析期間	空間解像度	備考
ヨーロッパ中期予報センター	1958年～現在	TL159/60層	実行中
米国環境予測センター/米国大気研究センター	1948～1996年	T62/28層	終了(1996年以降の解析は延長実行中)
米国環境予測センター/米国エネルギー省	1979～1999年	T62/28層	実行中
米国航空宇宙局	1979年～	1x1度/48層	実行中
気象庁/電力中央研究所	1979～2004年	T106/40層(予定)	準備中

空間解像度のTやTLは、スペクトルモデルにおける切断波数を表す。
T106およびTL159は計算格子間隔で110km程度、T62は180km程度に相当する。

3 - 5 ま と め

本章では、当所がこれまで進めてきた温暖化予測研究の成果について紹介してきた。予測のために必要な気候モデルを整備するという観点からは、所期の目標をほぼ達成できたと言えるであろう。しかしながら、温暖化現象自体は極めて複雑な現象であり、分かってきたことも多いが、一方で研究の進展によって明らかになった新たな問題もある。

気候モデルの問題点

IPCCの第三次評価書（2001年）によれば、世界各国の気候モデル（大気・海洋結合モデル）には、相当大きな予測幅が存在することが明らかになってきている。図1は、SRESシナリオのうちA2シナリオ（1-1節コラム2参照）に対する世界各国の7種類のモデルによる温暖化予測結果を示したものである。図のように、2100年時点の気温上昇の予測幅は1990年比で約1.6（気象研のモデル）～約5.3（東大/環境研モデル）と相当大きい。今後、地球観測技術の進歩により、詳細なデータの蓄積への期待が大きい。そうしたデータと比較検討する等によって、気候モデルの問題点をいち早く把握し、予測の信頼性を向上することが今後の緊急の課題であろう。

計算科学の問題点

最近のスーパーコンピュータの性能向上は目覚ましく、当所では2000年10月から新並列スーパーコンピュータ

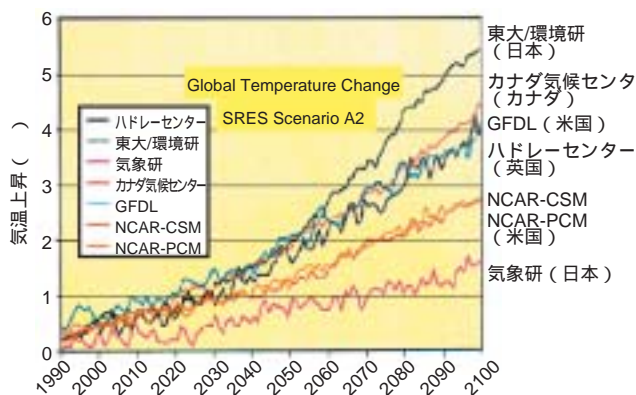


図1 気候モデルの違いと温暖化予測結果
（IPCC 第三次評価書（2001年）より）

VPP5000/32CPUを導入した。また、文部科学省のプロジェクトにより、2002年度には、世界最高速の地球シミュレータGS40/5120CPUが完成し、運用される計画である。3-1節の図3-1-4の予測例では、100年間の予測に約1週間（SX-4/32CPU, 64Gflops）の計算時間を必要とした。しかし、地球シミュレータでは僅か15分程度ですむことになる。当所では、1998年より文部科学省の振興調整費総合研究として、地球シミュレータに適した超高速・超高解像度の気候モデル開発を進めているところである。

温暖化防止の長期目標

国連気候変動枠組条約の究極の目標は、「気候システムに対して、“危険”な人為的干渉を与えないレベルで温室効果ガス濃度を安定化させること」、である。しかし、その目標となる濃度レベルがどの程度なのか、何時の時点で安定化するのか、依然としてはっきりしていない。例えば、550ppmで濃度を安定化するには、22世紀中葉までに、全世界のCO₂排出量を現在の1/3程度まで大幅に削減する必要がある。その削減量から濃度の推定法（コラム3参照）に科学的な不確実性があるにしろ、濃度安定化は相当困難と言わざるを得ない。

一方、安定化の濃度レベルが高ければ高いほど、実際の削減は容易になるし、現実的な削減対策を検討することも、気候変化に備えた適応等の行動をとることも可能になる。濃度安定化レベルの議論は、我が国電気事業ばかりでなく、世界のエネルギー産業にとって、極めて重要な関心事である。

そのためには、様々な濃度安定化レベルに対して、気候状態がどの程度異なるのか、という疑問に対する科学的な高精度の予測が不可欠である。気温上昇の予測だけでは不十分で、削減シナリオによって台風等の異常気候はどの程度差があるのか、あるいは非可逆的現象が発生しないかどうか、例えば海洋の熱塩循環が停止しないかどうか、といった疑問に答えられる必要がある。今後の大きな課題である。