

1. はじめに

気候システム研究センター (Center for Climate System Research; CCSR) は、地球の気候形成や地球温暖化などの科学的課題に挑むべく 1991 年に東京大学に設置された全国共同利用施設である。気候システム研究センターの使命は、大気、海洋、陸面などからなり、地球の気候を決める「気候システム」の大規模な数値モデル群を開発し、それらを用いた気候研究の推進を行うことである。

個人研究レベルの小規模なプログラムから始めた気候モデル構築であるが、現在では全国の共同研究者を巻き込んだ大がかりなプロジェクトになりつつある。このような大規模プログラムの開発の基盤として、気候システム研究センターは発足当初より東京大学情報基盤センターの大型計算機にその計算資源を頼ってきた。近年では、世界最高速計算機、地球シミュレータを用いた温暖化予測実験も実施したが、その基盤となる気候モデルソフトウェアの開発は、情報基盤センター計算機の利用なくてはなし得なかったことである。

以下に、気候システム研究センターがスーパーコンピュータを駆使して行う研究の一環をご紹介します。

2. 気候モデルとは

気候システムとは、われわれの住む地球の気候を決める、大気、海洋、陸面、海氷など地球の表層のサブシステムの総称である。気候システム研究センターでは、これらを物理法則に従うシステムとして研究し、気候の成り立ちや、その変動の仕組みを明らかにしようとしている。

物理学や化学と異なり、地球を相手にする気候学では、仮説の検証を行なうのに実験をするわけにいかない。そこでわれわれは、自然の観測から知れた知識をコンピュータプログラムという形で具現化し、そこでさまざまな実験を行うことによってこの制約を克服しようとしている。すなわち、コンピュータの中にもう一つの地球を作り、それを用いて気候システムの仕組みを研究するのである。

気候システム研究センターの開発する気候モデルは、実際の地球の気候システムをできるだけ忠実に模倣しようとするもので、地球を覆う大気や海洋の運動や、水の相変化などを、流体力学や熱力学といった物理法則に基づいた偏微分方程式系として定式化し、これを離散化して、時間発展問題として解く。たとえば、大気や海洋の運動は3次元の格子に細分化して、回転球面上の流体力学式として解かれる。大気運動を計算する部分には毎日の天気予報を行っているモデルと同じで、大気大循環モデルと呼ばれる。積分時間の短い天気予報と異なり、100年やそれ以上の時間スケールも扱う気候モデルでは、海洋や海氷など時間スケールの長い気候サブシステムも計算する必要がある。とくに海洋は、気候形成にとって欠くことのできぬ重要な要素である。大気と方程式は似ているが、表層数百メートルだけでなく、数千メートルの海底までおよび、数千年の時間スケールで全世界をめぐる深層循環も計算する必要があるため、より多くの計算資源を要する。

大気海洋の流体力学計算は、連続体の離散化計算であるから、計算格子は細かければ細かいほど正確になる。しかし、格子間隔を半分にしても、水平2方向、鉛直1方向に加えて、時間きざみも半分にしなくてはならないため、都合2の4乗=16倍の計算資源が要ることになる。気候モデルが大型計算機を必要とする所以である。

地球気候の熱エネルギー収支を考える上で、放射過程の重要性も見過ごすことはできない。大気中の微量成分、ことに水蒸気や二酸化炭素、また、さまざまな形態の雲による吸

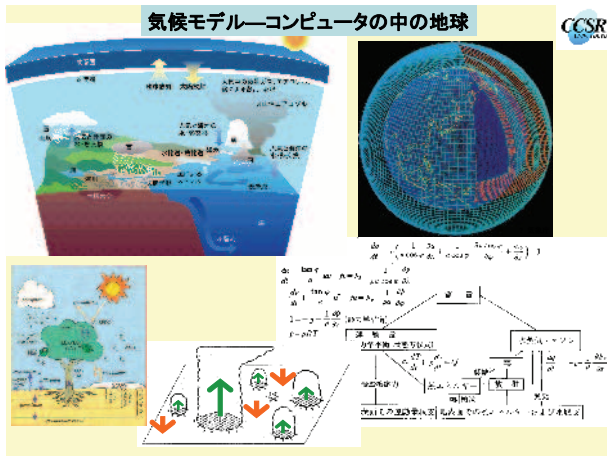


図1 気候モデルの概念図。

収、射出や、微粒子（エアロゾル）による散乱などの過程も正確に扱う必要がある。気候システム研究センターでは、大気モデルの根幹をなす放射伝達計算モデルを独自に開発し、世界中の研究者に用いられるまでになっている。

このほか、陸面での水文過程や海水の生成、消滅、移動を計算する海水モデルなどのサブモデルを大気・海洋大循環モデルと結合して、気候モデルの根幹が形成される。近年では、オゾンホールなどに関係した大気中の化学過程や、大気汚染、黄砂現象などにも

関係するエアロゾルの効果、さらに気候変化による植生など生態系の変化等々、次々と新しいプロセスが取り入れられ、気候モデルは、これまでの大気海洋中心の流体力学モデルから、統合地球環境モデルへと進化しつつある。

気候モデルは物理法則にのっとって構築されるが、理論ばかりで立ち行かない部分がある。それは、計算資源の制約から計算格子が十分に細かくとれず、その中で起こる、サブグリッドスケールの気象、海洋現象が格子スケールへ与える影響（フィードバック）が理論的に十分解明されていないことである。たとえば、熱帯では、100km四方の計算格子の中にも多数の高さや大きさの異なる雲が存在するのが普通である。個々の雲の動向に追従するのは無理としても、これらの雲が集団として格子スケールで熱や水蒸気を上空へ運ぶ効果を正確に見積もる必要がある。気候モデルでは、サブグリッドスケール現象の効果を格子平均の物理量で表現することを「パラメタリゼーション」と呼んでいる。乱流でのクロージャー問題と類似しているが、単にスケールの異なる流体運動を表現するのみならず、雲やそれにかからむ放射など大気や海洋特有の現象の効果を扱う必要があるため、一般論は存在せず、ある程度の経験論の余地を残している。このパラメタリゼーションに伴う不確定が、地球温暖化予測における予測幅をもたらし、世界各国の気候モデルのパフォーマンスの差異をもたらしている。パラメタリゼーションの精度向上は、単に気候モデルの計算上の要請にとどまらず、地球流体におけるスケール間相互作用理解の本質に関わる科学的な課題である。

3. 気候モデルによる将来予測、過去の再現

気候モデルの開発と同時に、それを用いて気候形成や異常気象、気候変動のメカニズム解明を行うことも気候センターの大きな使命である。

この節では、最近気候システム研究センターが国立環境研究所、地球環境フロンティア研究センターと共同で行った地球温暖化の将来予測計算と、氷河期の地球の再現に挑戦する古気候モデリングの話題を紹介する。

気候モデルによる地球温暖化予測

情報基盤センターでいち早く導入された並列計算機は、気候モデルの並列化作業を著しく加速させ、地球シミュレータ上での世界最高解像度の大気海洋結合気候モデルの実現に導いた。われわれは、このモデルを用いて20世紀気候の再現とそれに引き続く21世紀の気候予測計算を行った。

上にも述べたように、解像度の向上は、べき乗算的な計算資源の増加を要求する。作業

は、これまでに構築してきた大気-海洋-海氷-陸面結合気候モデルの並列化プログラムとしての効率の向上と、モデル全体を総合した気候学的パフォーマンスの向上～パラメタリゼーションの改善、調整という2面が並行して行われた。

モデルのベクトル化、並列化は、情報基盤センターの計算機上でほぼ終わっていたので、地球シミュレータでの作業は順調に進んだ。図2は、実現した高解像度大気海洋結合モデル MIROC (Model for Interdisciplinary Research On Climate) による、海面水温と土壌水分の再現値である。図3は、海面高度の計算値を高解像度版(大気約100km、海洋20km×30km)と中解像度版(大気約300km、海洋100km×150km)の結合モデルで比較したものである。これまで、温暖化実験のような長期間積分を要する大気海洋結合モデルで、幅100km程度の黒潮が正確に再現されることはなかった。高解像度モデルでは、黒潮の経路、離岸緯度が正確に表現され、まだ流路に存在する数百kmスケールの海洋中規模渦も表現されている。

パラメタリゼーションの表現する物理過程の向上とモデル全体のバランスを取ることも結合モデル構築にとっては重要な作業である。地表の7割を占める海面水温を外部データとして与える大気大循環モデルや海流を決める風を観測データで与える海洋大循環モデルが単独で素晴らしいパフォーマンスを示したとしても、それらの結合系はどこへゆくかわからない-シミュレートされた気候状態が現実からどんどんずれてゆく「気候ドリフト」が生ずる。今回は入念な雲放射過程の調整等によってこれを避け、大気海洋の微妙な相互作用で決まる海水の分布もよく再現することができた。

図5は、行った実験の概略を示している。横軸はシミュレートした西暦年、縦軸は全球年平均地表気温の現在気候(1961-90年の平均)からの偏差である。大気海洋結合モデルであるので、モデルに与える外部変数は、地球の半径、地形、太陽定数などに加え、大気中の二酸化炭素などの濃度である。計算初期の大気海洋の状態もモデルの長期積分からこしらえる。したがって、何年何月の異常気象、といった実際のイベントはシミュレートされない。そのかわり、人為起源の温室効果気体による温暖化効果がどの程度であるかなどの評価が行えるわけである。このような、要因解析を十分に行うため、積分量の限られる高解像モデルに加えて、中解像度モデルも併用した。

20世紀気候の再現実験においては、大きく分けて2つの気候変動要因がモデルに与えられる。一つは、自然要因で、太陽定数の(わずかな)変化と火山の噴火である。太陽定数はともかく、成層圏に達する大規模な火山の噴火は、噴煙からの微粒子の停留により、数年にわたって地球の温度を下げる効果がある。図6は、中解像度モデルでおこなった20世紀再現実験の結果である。赤の観測時系列を黒および灰色のモデルアンサンブル(自

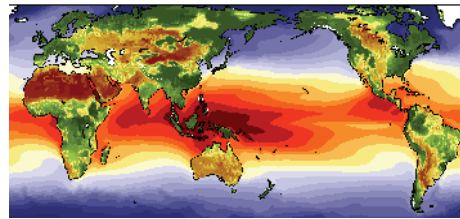


図2 高解像度大気海洋結合モデルによる海面水温と土壌水分の再現値。

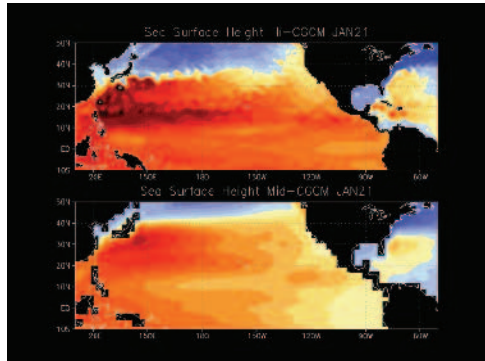


図3 大気海洋結合モデルによる海面高度の計算値。(上) 高解像度モデル、(下) 中解像度モデル。

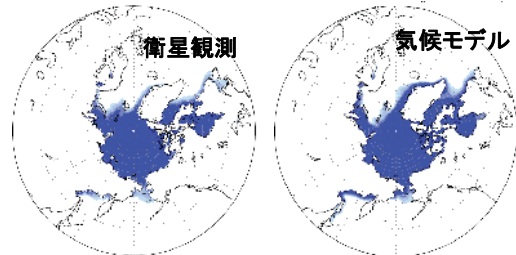


図4 2月の海氷密度分布。(左) 衛星観測、(右) 高解像度大気海洋結合モデル。

然変動による誤差幅を定量化するため、4つの異なる初期値から実験を行っている)がよく追従していることがわかる。ことに、20世紀中頃の一時的な昇温とその後の停滞、20世紀最後の30年の急速な昇温、という観測された全球気温時系列の特徴がよく再現されている。要因解析によれば、20世紀半ばの昇温は自然要因によるものだが、20世紀最後の昇温は、人間活動による温室効果気体増加を考慮しなければ説明できないことがわかった。すなわち、人間による地球温暖化はすでに起こっている。

将来について、地球全体についてみれば両極や寒冷地を最大とする顕著な昇温が起り、平均的な降水量も増加するというこれまでの知見が再確認された(図7)。しかし、分解能が足りないため、これまでは十分な信頼性をもって語られなかった、地域気候の変化が、高解像度モデルによって記述され始めた。これまで、気候モデルで表現されなかった梅雨前線に大きな影響を受ける日本付近がその一例で、温暖化しても梅雨前線の活動は衰えることなくむしろ活発で、豪雨の頻度増加が将来心配される結果となった(図8)。また、高解像度モデルならではの黒潮については、その離岸位置などに大きな変化はないが、流速が最大3割近く増加する予測結果となった。

このような最新の地球温暖化予測結果は、2007年に刊行を予定される気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の第4次報告書にも盛り込まれ、また、一般社会における温暖化対策の加速にも大いに貢献した。

気候モデルによる古気候研究

現在、将来だけでなく、過去の気候を研究することも興味深く、意味のあることである。現在に比べて格段にデータの少ない過去気候の再現に気候モデルが用いられ、また、現在とは極端に異なる氷河期の気候の再現を目指すことで、モデルの精度の向上にも資する。

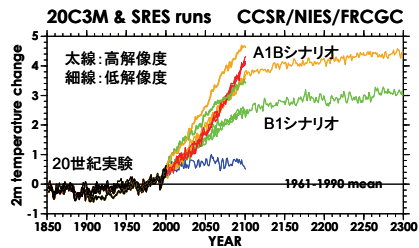


図5 気候モデルによる温暖化実験結果。全球平均地表気温の時系列。

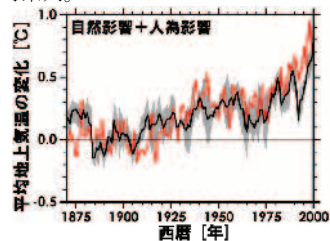


図6 19世紀末～20世紀の全球平均地表気温時系列。赤は観測値、黒はシミュレーション。

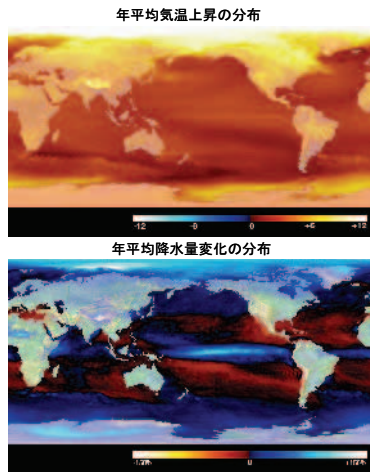


図7 高解像度気候モデルでシミュレートされた21世紀末の年平均地表気温(上)と同じく降水量(下)の現在気候値からの増加量。

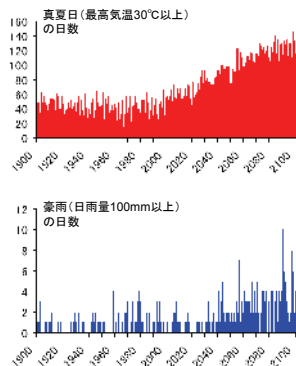


図8 日本付近における日最高気温が30℃を超える真夏日日数(上)と日雨量100mm以上の「豪雨」日数の推移。高解像度気候モデルによるシミュレーション。

地球は過去、約 10 万年周期で氷河期と間氷期の間を行き来してきた。その間の気温差は約 10°C。現在は間氷期である。現在の地球温暖化は昇温量そのものもさることながら、変化のスピードが極端に早いことが問題で、生態系が追従できず、過去にはもっと大きな変化があったのだから多少の温暖化くらい大丈夫、というようなことにはならない。

ともあれ、標高数千メートルに達する大規模氷床が存在した氷河期の気候をシミュレートし、不可思議な 10 万年周期の謎を解くことは、多くの気候学者の夢である。

氷期-間氷期間の気候振動は、約 2 万年および約 4 万年周期の地球軌道変動が地球気候システムとくに氷システムによって変調されて生じると今では広く考えられており、原因となっている地球軌道変動は提唱者の名を冠して Milankovitch フォーシングとも呼ばれている。近年、氷床から採取した氷の分析から大気中二酸化炭素濃度(CO₂)が氷期サイクルと同調して変動していることが知られ、氷期サイクルは炭素のグローバル循環とも関連することが示唆されている。このように、氷期サイクルの原因における Milankovitch フォーシングと CO₂ の役割、および、これらが氷期サイクルを引き起こすメカニズムはまだあきらかではない。Milankovitch サイクルについてのこれまでの研究は、数学的見通しがよく、計算時間もかからない、シンプルな気候モデルを用いてきたが、気候システム研究センターでは、フォーシングやフィードバックメカニズムは大気大循環モデルを用いて見積もり(図 9a)、氷床変動を独自に開発した 3 次元氷床力学モデルを用いることで、現実的なサイクルの再現に成功することができた(図 9c、図 10)。大気海洋結合モデルと氷床モデルを結合してより本格的な氷期サイクルの再現に挑戦する試みも始めている。

4. 気候を決めるさまざまなプロセスの研究 気候モデルを用いた気候変動メカニズムの解明 成層圏における年々変動

ジェット機の飛ぶ高度から数十 km にわたって広がる成層圏では、雲もなく、一見穏やかであるが、興味深い大気現象が多々発見されている。気候システム研究センターでは、世界に先駆けて、大気大循環モデルを用いた赤道下部成層圏に存在する東西風の準 2 年周期振動 (QBO) のシミュレーションに成功した。図 11 はその結果を示している。周期や振幅など、定量的にも観測と同様な結果が得られている。この準 2 年振動は大気波動の非線形相互作用によって作られており、その現実的な再現の過程を通して、目には見えにくい大気波動の気候学的性質を明らかにすることになる。

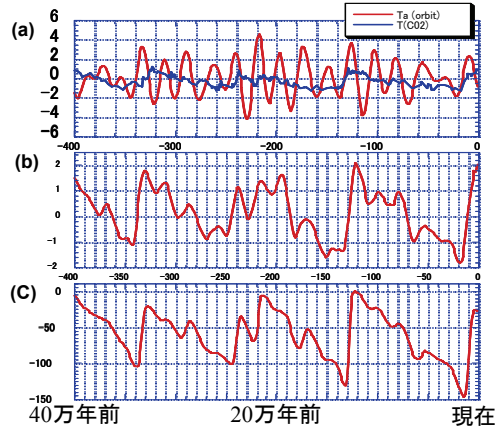


図 9 a) 大気大循環モデルによる気温変化の見積もり (赤: 軌道要素の影響; 青: CO₂ の影響)、b) 地質データによる過去の気候変動、c) モデルによる氷床変動の再現。

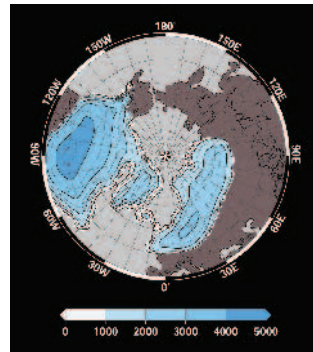


図 10 最終氷期氷床の数値シミュレーション。

気候の十年規模変動

全球的な観測データの整備が進むにつれ、気候変動の中に数十年の長い周期を持つ現象があることが知られてきた。数十年分の観測データからそのメカニズムの詳細を明らかにすることは困難であるが、気候モデルのシミュレーションがそれを大いに助けることになる。図 12 は、気候システム研究センターの大気海洋結合モデルがシミュレートした北大西洋の十年規模変動を観測データを比べたものである。観測の少ない、海面下のモデルデータを解析することにより、数十年の周期を決める海洋の力学が明らかになってきた。

エアロゾルの気候影響

工業活動や農業活動から大気汚染ガスやエアロゾル粒子が発生する。これらは温室効果や日傘効果を作りだす直接放射効果によって放射エネルギー収支を変化させる。また、エアロゾルは雲凝結核として雲のライフサイクルを変えるために、雲量や雲の特性が変わる。このようなエアロゾルの間接気候影響によっても気候変化が起こる。

図 13 は人工衛星から得られた小粒子エアロゾルと大粒子エアロゾルの光学的厚さの全球分布と、硫酸塩エアロゾル、炭素性エアロゾル、土壌性エアロゾルの光学的厚さのモデル計算値を示している。衛星観測によると大陸周辺の人間活動の激しい地域で小粒子が卓越しており、それに対応して、これらの地域で小粒子の硫酸塩エアロゾルと炭素性エアロゾルのモデル値が大きくなっていることが分かる。また、サハラ砂漠などの亜熱帯の乾燥地域で大粒子の土壌性エアロゾルが卓越している様子が衛星観測とモデルによって分かる。

このように地球は様々なタイプのエアロゾルによって複雑に覆われていることがモデルと衛星観測で明らかになる。

さらにエアロゾルは雲の特性までも変えてしまう。人間活動などで小粒子エアロゾルが増加すると、それらが雲凝結核となって低層雲の雲粒子数も増加し、そのために雲粒子の代表的なサイズも小さくなる。人工衛星によって観測された有効粒子半径の全球分布とモデル計算値が図 14 に示されているが、

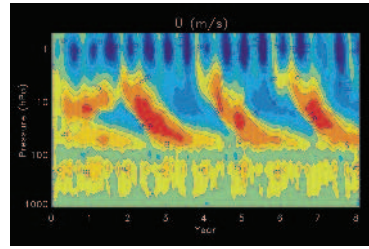


図 11 赤道成層圏準 2 年振動のシミュレーション。縦軸は気圧高度横軸は時間(年)、陰影は経度平均東西風。

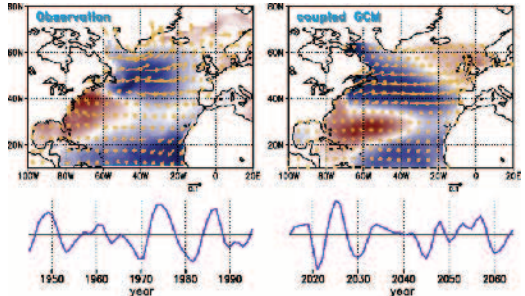


図 12 北大西洋十年規模変動に伴う海面水温 (陰影) および海上風 (矢印) の年々偏差。(左) 観測、(右) 大気海洋結合モデル。下図は、上図のパターンの変動時系列。

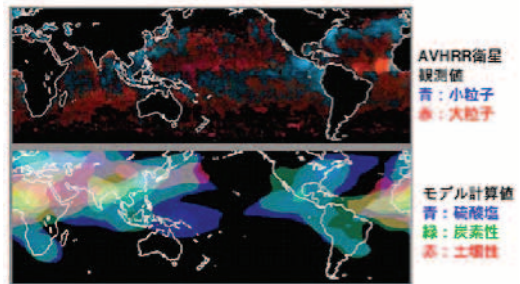


図 13 衛星から得られた小粒子と大粒子エアロゾルの光学的厚さの全球分布 (上) と、硫酸塩エアロゾル、炭素性エアロゾル、土壌性エアロゾルの光学的厚さのモデル再現値 (下)。

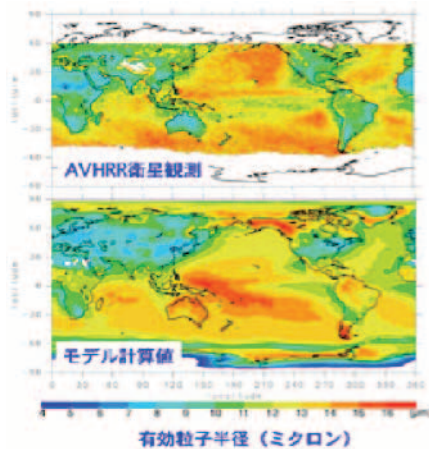


図 14 衛星から得られた水雲(雲頂温度が 273 度以上)の有効粒子半径の全球分布 (上) と、エアロゾルモデル SPRINTARS による計算値。(下)。

大陸上とその周辺の小粒子エアロゾルが多い地域で雲の有効粒子半径が小さくなっていることが分かる。

温室効果ガスの実態と挙動

CFC11 や CFC113 などのフロン類は、成層圏オゾン層の破壊物質であるばかりではなく、地球温暖化の原因物質でもある。そのため、成層圏オゾンも壊さず、温室効果も少ない、新たなフロン代替物質の開発が進められている。それらの物質開発のためには、実際にその物質を製造、使用する前に、事前に気候、環境影響評価を行う必要がある。気候システム研究センターでは、スーパーコンピュータを用いた大気中での物質輸送計算モデルを用いてこのような評価を行っている。評価対象物質の大気中への放出、風による輸送・拡散、大気中や海面などでの分解、除去反応などをモデル化して、大気中での濃度分布や分解生成物の分布シミュレーションを行い、それらの濃度データを元に放射伝達計算を行うことにより、気候影響を評価する。

図 15 の左図は、大気中寿命が 6 年のエーテル系化合物 (hydrofluoroether) の予想大気中濃度。右図はこの物質の放射収支に与える影響を測る放射強制力である。この物質の場合、代替されるべきフロン物質と比べて、1/3~1/5 の気候影響しかないという結果が得られている。

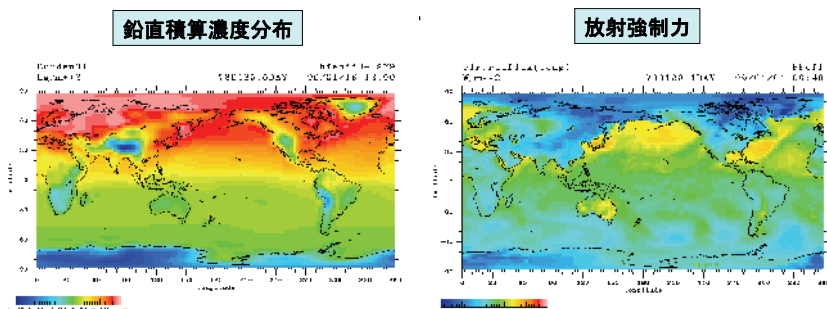


図 15 (左) エーテル系化合物 (hydrofluoroether) の予想大気中濃度。(右) その放射強制力。

海洋深層循環と気候

海洋の深層 (深さ数千メートル) には、大洋をまたぐ全球的な循環が存在している (図 16)。この海洋深層循環は、われわれの住む地球表層環境を決める上でも重要な役割を果たしている。海洋深層循環は、海面での密度差によって駆動されているが、その循環によって暖かい水と冷たい水の交換が起こり、その結果太陽から受け取るエネルギーの地域的な不均一を解消し、われわれがより生活しやすい環境を維持していると考えられるからである。現在、この海洋深層循環の起源となる水は、北大西洋高緯度域と、南極大陸の陸棚周辺で生成されていることが知られている。大西洋ではより活発な深層循環が存在していることから、ヨーロッパでは高緯度に位置しながら比較的温暖な気候が維持されている。

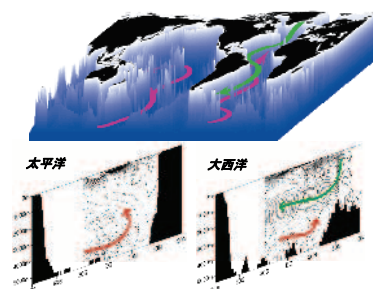


図 16 海洋深層循環の模式図。下の図は、太平洋左)、大西洋 (右) での鉛直構造 (子午面流線関数) を示している。

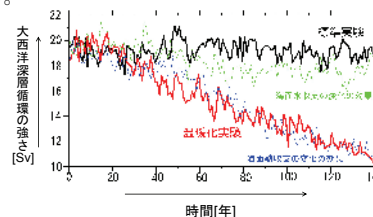


図 17 地球温暖化実験における大西洋深層循環の強さの変化時系列。二酸化炭素濃度は、標準実験では産業革命前の値に固定。温暖化実験は 1%/年の割合で増加。

地球温暖化の影響で海洋深層循環が変化し、さらなる気候変動を引き起こすのではないかと、ということが議論になっている。近年公開された映画「デアフタートゥモロー」はその仮説をデフォルメしたものである。このような仮説に対してより確かな科学的な回答を得るためにも、気候システム研究センターでは気候モデルの開発、改善を行っている。最新のモデルの結果（図 17）からは、温暖化によって大西洋での深層循環は弱まるが、完全に停止する可能性は低いと考えられる。また、その弱化的原因には、「海面での水収支（降水、蒸発、河川流入など）の変化」と「海面での熱収支の変化」が考えられますが、後者の効果が支配的であることがわかってきた。世界中の研究機関で同様な計算が行われ、モデル間の結果の比較も行われている。われわれのモデルもこのような国際的な比較プロジェクトに積極的に参加し、モデルの向上に役立っている。

惑星大気

大気大循環モデルは、地球以外の惑星にも適用され始めている。たとえば、火星では、平均地表面気圧が 6hPa、大気成分の 95%を占める CO₂ が極域では凍り、全球が砂嵐で覆われる巨大ダストストームが発生する。このように、火星の大気環境は地球のそれとは大きく異なるが、基本は回転流体であり、条件の大きく異なる惑星へのモデルの適用は、その惑星の謎の解明とともにモデルの精度向上にも資するものである。

5. 次世代気候モデルへ向けて

2. でも述べたように、気候モデルは、これまでの大気海洋の流体力学中心のモデルから、大気化学や物質循環など、より広範なプロセスを含んだ統合地球環境モデルへと急速に進化しつつある。また、流体力学部分についても、これまではパラメタライズせざるを得なかった個々の雲も陽に解像する、超高解像度の全球雲解像気候モデルが出現しつつある。

大気海洋モデルから統合地球環境モデルへ 大気化学モデル

気候システム研究センターでは、オゾンホールなどに関わる成層圏化学に加えて、気候・大気環境両面で重要なオゾンを中心とした対流圏の光化学をシミュレートできる全球化学気候モデルを開発している。図 18 は対流圏オゾンと一酸化炭素および PAN（ $\text{P}\alpha\text{N}$ （ $\text{P}\alpha\text{N}$ ）と呼ばれる物質のシミュレーション結果の一例である。これらの気体はいずれも重要な汚染物質であり、図 18 は大気中の汚染の様子を示している。東アジア域から太平洋を挟んで北米にかけて長距離かつ大規模にオゾンや PAN が輸送されている様子が見られる。ヨーロッパから日本付近にかけては高濃度の一酸化炭素が輸送されて来ている様子が分かる。オーストラリア付近に目を移すと、インドネシアの森林火災で放出された一酸化炭素やアフリカの森林火災で放出され長距離輸送された一酸化炭素の分布が見られる。

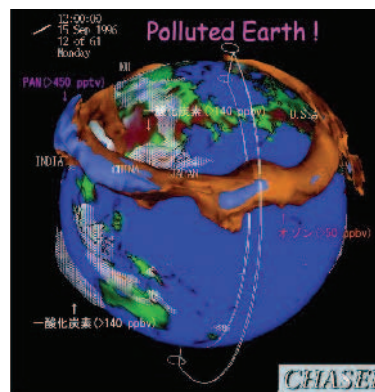


図 18 大気化学モデルによるシミュレーション例。

炭素循環と海洋深層循環

これまでの地球温暖化計算では、空間的変動の激しいエアロゾルなどを別にして、比較的一様な二酸化炭素の量は外部変数として与えてきた。しかし、地球温暖化の真の行く末を評価するためには、気候システム内の炭素循環をシミュレートする必要がある。ことに、海洋中には大気中の約 50 倍もの炭素が含まれており、大気との間で常に炭素の交換が起きている。したがって、大気中の二酸化炭素濃度は、海洋中での炭素循環にも大きく影響を受けている。海洋中の炭素は、海洋表層では生物によって利用され、その死骸や排泄物として沈降し深層で再び分解される（生物ポンプ；図 19）。一方、海洋深層循環は生物ポンプにより深層に落とされた炭素を集めながら世界中を巡り、その上昇流とともに炭素を海洋表層に戻している。また、生物活動に必要なさまざまな栄養塩（リン酸、硝酸など）も炭素と同様に海洋中を循環している。さまざまな物質を運ぶ海洋深層循環の「ベルトコンベアー」としての役割についての研究も重要な課題のひとつである。

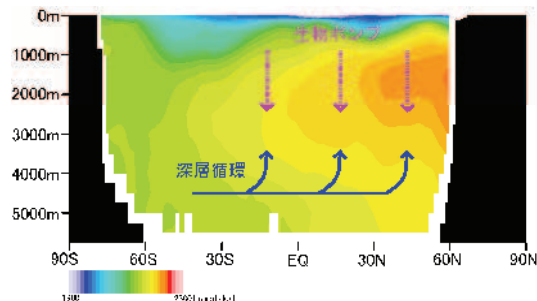


図 19 海洋中の炭素の流れの模式図。カラーは全炭酸量の太平洋での東西平均値。

温暖化に伴う植生分布の変化

これまでの気候シミュレーションでは、陸上の植生分布（森林や草原などの分布）は外部データとして与えられてきた。しかし、温暖化や古気候など現在と異なった気候環境下では、植生もそれに応じて変化し、それが翻って気候変化にも影響を与える可能性がある。この問題を解決するため、われわれは気温や降水量が変わると植生も自動的に変化する「動態植生モデル」を気候モデルに組み込む試みを開始した。

われわれの最新の成果では、温暖化による植生分布の変化を表現することに成功した(図 20)。その結果では、ツンドラが森林に置き換わることで温暖化がさらに強化される。また、それに伴って土壌炭素の分解も促進されるため、大気 CO2 濃度が上昇することで温暖化がさらに促進される可能性が示された。

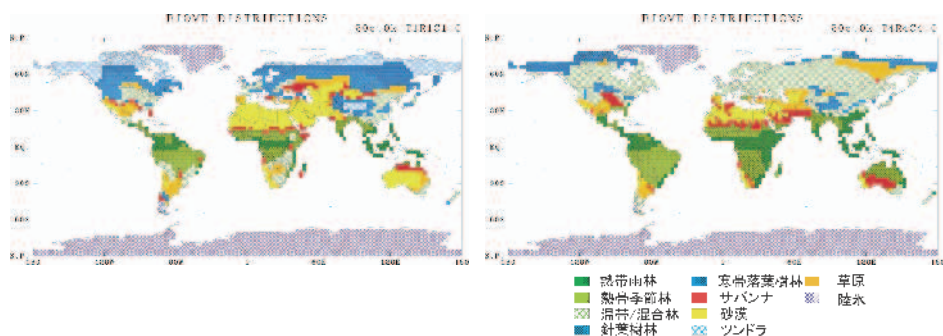


図 20 気候モデルと結合した動態植生モデルによって計算された植生分布。左：産業革命前 右：二酸化炭素 4 倍増時。

全球雲解像モデルへの挑戦

気候システム研究センターでは、世界に先駆けて「全球雲解像モデル」の開発を進めている。全球雲解像モデルは、地球全体を5km以下の水平メッシュで覆う超高解像度の気候モデルである。従来の温暖化予測等に用いられている気候大循環モデルは、水平解像度がせいぜい数10km以上にとどまらざるを得ず、気候大循環の駆動源として重要な熱帯の雲降水プロセスを解像することができなかった。このような雲降水プロセスの不確実性が、気候予測の最大の難点の一つである。全球雲解像モデルは、雲降水プロセスを忠実に表現することで、この不確実性を取り除こうとするものである。

全球雲解像モデルは、正20面体を分割することで、球面上をほぼ一様な間隔で覆う新しいメッシュシステムを採用して

いる(図21)。気候システム研究センターは、海洋研究開発機構地球環境フロンティア研究センターとともに、正20面体格子にもとづく新しい気候モデル非静力学正20面体格子気候モデルNICAM(Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model)の開発に成功した。

全球雲解像モデルNICAMを用いて地球シミュレータ上で3.5kmメッシュの全球雲解像実験を行った結果を図22と図23に示す。実験は、全地球が海洋で覆われていると仮定した「水惑星実験」という理想化したものであるが、現実とよく似た熱帯のマルチスケールの積雲の構造がとらえられている。数1000kmスケールの東進するスーパークラウドクラスターの内部には、数100kmスケールのクラウドクラスターが西進している。このクラウドクラスターの中には10km程度のスケールの積雲が1時間程度の寿命で発達衰弱を繰り返している。

全球雲解像モデルによって、雲降水システムを全球にわたって表現することが可能になった。このモデルによって、従来の方法では予測することが難しかった台風の発生・発達や、夏季の天候、豪雨の頻度について、より信頼性の高い予測が得られることが期待される。

全球規模の気候研究といえども、個々の雲の振る舞いもシミュレートする時代がやって

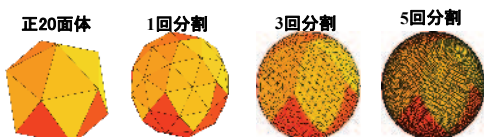


図21 正20面体格子：左からももとの正20面体、1回分割、3回分割、5回分割して得られた格子配置。

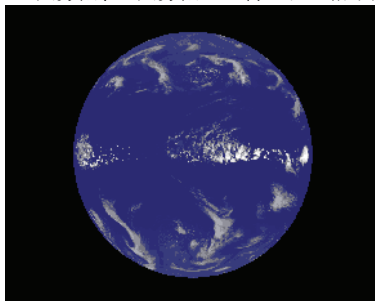


図22 水平メッシュ間隔3.5kmの全球雲解像モデルによって得られた雲画像。全地球が海洋に覆われていると仮定した水惑星実験により計算された気候上端での赤外放射量で、白い場所は高度が高い雲を表す。

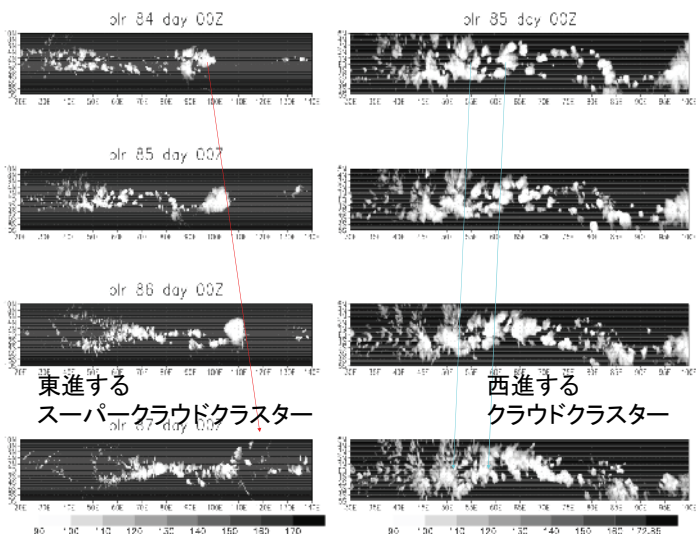


図23 左は水平スケール約6000kmのスーパークラウドクラスターが東進する様子。右は、その中で数100kmスケールのクラウドクラスターが西進している様子を捉えている。3.5kmメッシュNICAMによる結果。

きた。しかし、これらの雲の振る舞いについてさまざまな気候条件のもとで観測的に十分に知られているわけではない。全球的な雲の振る舞いの実態を把握するためには、高精度の衛星観測が力を発揮する。上述の NICAM モデルによる東進するスーパークラウドクラスターのシミュレーションは、過去最大規模の 1997-98 年のエルニーニョ終息期の 1998 年 5 月に降雨レーダ搭載衛星 TRMM が観測した東進波によく類似している (図 24)。

このような東進波に伴う雲システムの実態とはどのようなものか？ 高解像度の衛星雲データを用いた解析によると、雲発達は、低層雲のみの期間、上空の融解層 (~0°C) まで発達する雄大積雲期を経たのち、爆発的に対流圏トップにまで達する背の高い積雲群へと、組織的な発達段階を経ることがわかってきた (図 25)。

現在大きな謎とされるスーパークラウドクラスターの東進メカニズムも、新世代の衛星観測と雲解像モデルによっていずれ解き明かされることだろう。

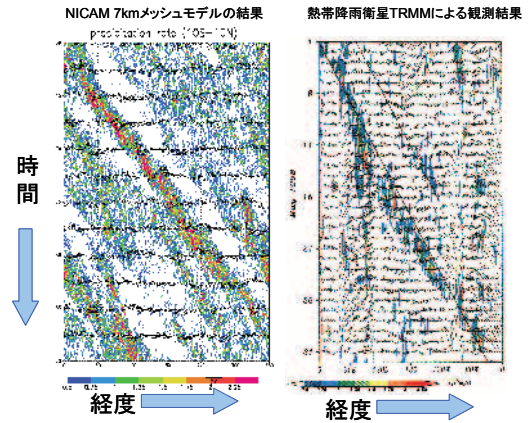


図 24 降水量の赤道における経度-時間変化図。スーパークラウドクラスターが 1 ヶ月かけて赤道に沿って東向きに地球を一周している。左は 7km メッシュ NICAM によって計算された結果、右は熱帯降雨衛星 TRMM によって得られた観測結果。

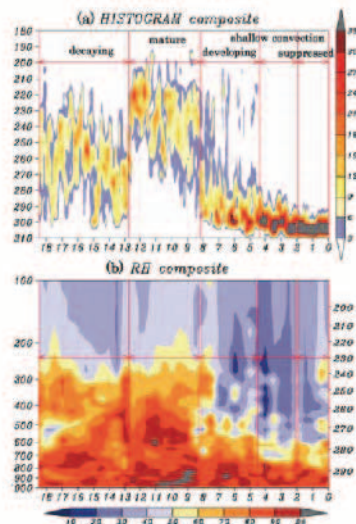


図 25 (上) 赤道東進波に伴う雲頂温度の時間変化 (右から左)。色が濃いところはその高さに雲頂を持つ雲が多いことを示す。(下) 相対湿度の時間変化。湿潤層の発達の様子と雲の発達の様子はよく対応している。