

6. モデル統合化領域

(1) 目標

<研究の背景と意義>

地球フロンティア研究システムは、エルニーニョ、地球温暖化のような様々な地球変動の予測を可能にすることを目的として研究を行っている。最終目的である予測を行う方法は、大気モデルを用いた数値天気予報のように、対象とする変動現象の生起する領域の数値モデルを作り、そのモデルを用いて数値実験（コンピューターシミュレーション）を行うことによって将来の状態をコンピューターの中に作り出す、というものである。

エルニーニョ現象にしても、地球温暖化にしても、地球変動は多くの物理的・化学的・生物的变化のプロセスの連鎖として起こっているものであるから、それを再現するモデルは個別プロセスの絡み合いを正しく表現したシステムのモデルでなければならない。地球フロンティアの各研究領域では、地球変動予測モデルのいわば部品となる個別プロセスについての研究や、サブシステムの変動と言える地域的現象のメカニズムの解明とモデル化を目的とした研究が進められている。このような研究を最終目的に結びつけるには、その成果を取り入れて地球規模の数値モデルにまとめ上げる必要がある。

各個別プロセスをより多くより詳しく（厳密に）取り入れた高度の地球変動予測モデルを作るには、大量の計算機資源を必要とする。そのため、地球シミュレータ計画が姉妹プロジェクトとして推進され、2002年3月に予定通り運用を開始した。この現在世界最高の計算能力を持つ地球シミュレータをフルに活用して高度の地球変動予測モデルを開発することが求められている。

<研究の目標>

モデル統合化研究領域のミッションは、地球シミュレータの活用を念頭において、各領域での成果を生かした高度のプロセスを含んだ高解像度の気候モデル、その他のモデルを開発する事である。また、気候モデルによる気候変動の予測に必要なデータ、特にその海洋部分のデータに関して、近年進歩の著しい地球規模観測システムで取得しデータを活用するのに必要なデータ同化システムの開発を進めることも重要なミッションである。

モデル統合化領域は、実質的には1999年度より活動を開始したが、その際地球シミュレータに向けたモデル開発の目標を次のように定めた。

- (i) 水平解像度 T213（メッシュ 60km 相当）、鉛直 50 層程度のスペクトル大気モデル、水平解像度 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 、鉛直 50 層程度の海洋モデル、および両者を結合したモデル。海洋モデルは、メソスケール渦を直接表現し、そのトレーサー輸送（G-M 輸送）を自動的に取り入れることを目指し、大気モデルは、地域的気候や台風・梅雨のような比較的小さな現象を再現する事を目指す。結合モデルの主用途の一つは地球温暖化予測実験である。
- (ii) 水平格子間隔 5km 以下の非静力学全球大気モデルの開発およびそれに匹敵するような新しい海洋モデルの開発。大気モデルは、地球シミュレータをフルに活用する事によりメソスケール対流システムを直接計算し、現在の最大の困難であるそのパラメタリゼーションを回避する。これにより台風、集中豪雨など日本やアジアにとって重要な現象のシミュレーションをより確かにすることができる。

- (iii) 大気・海洋・陸面の主として物理過程から成る現在の「気候モデル」をもとに、大気化学過程、海洋の生物地球化学過程、陸域の生態系と気候の相互作用などを取り入れた地球環境の「統合モデル」の開発。

以上は1999年に掲げた目標であるが、後半5年においても引続きこれら为目标に研究を進めて行く。

海洋データ同化に関しては、高度な最適化手法である随伴法やアンサンブル・カルマン法を用いて観測データと大循環モデルシミュレーションを統合する最先端の4次元データ同化システムを構築することによって、水塊分析ならびにその変動予測を可能とする次世代モデルの基盤を確立することを目標とする。これによって高品質の気候変動再解析プロダクトを創出し、他領域のプロセス研究に供するとともに、気候変動の解明に不可欠な熱・水4次元分配構造の過去・現在を正確に評価し、変動の構造を明らかにする。その際、4次元データ同化の優れた利点であるモデルと観測データを用いた逆解析によって、変動のオリジンとその経路を明確にする。

(2) 研究課題と研究実施計画

1) 研究課題と研究実施計画

a. 大気・海洋結合モデルの開発

a-1. 高解像度結合モデルの開発と温暖化実験

既存の力学フレームを用いた大気海洋結合気候モデルを大気・海洋共に高分解能化し、地球シミュレータ上で地球温暖化実験を行う。高分解能温暖化実験の科学的目標は、1) 海洋中規模渦を解像するモデルを用いて熱塩循環をはじめとする海洋循環の変化を調べること、2) 梅雨前線など地域的な気候の変化を調べること、および3) エルニーニョなど大気海洋結合系の自然変動の変化を調べること、などである。これによって、地球温暖化の将来予測の不確実性の低減に資する。

<実施計画>

モデル統合化研究領域の他、地球温暖化研究領域、水循環研究領域の研究者から成る領域横断の「温暖化実験チーム」を作り、さらにフロンティア外の東京大学・気候システム研究センター、国立環境研究所とも共同して高解像度化を中心とするモデルの開発を行い、それを用いて地球温暖化実験を実施する。

このために、まず高分解能結合モデルの構築、検証、改良、および高速化の作業を行う。モデルは、東大気候システム研究センターと国立環境研究所の共同で開発されたCCSR/NIESモデルをベースとする。大気は力学フレームとしてスペクトル法を用いており、T213 (~0.5° 格子相当) までの高分解能化の実績がある。海洋は自由表面の格子スキームを用いており、全球の海洋大循環では1° 格子、領域を限れば1/6° 格子程度までの高分解能化の実績がある。第一段階として、大気 T106 (~1.0° 格子相当)・海洋 1/4° (経度)×1/6° (緯度)格子のモデルを構築し、使用する。これと並行してモデルの高速化を行い、最終的な解像度は海洋 0.1° 格子・大気 T213 を目標とする。

高分解能結合モデルの構築作業は、大気・海洋モデルそれぞれの高分解能での動作確認と必要な修正の他に、高分解能の海氷モデル・陸面過程モデル・河川モデルの導入などを含む。高速化作業は、並列化効率の向上、地球シミュレータへのコード最適化などを含む。また、 0.1° 格子の海洋モデルでは、北極域で格子が集中して計算の時間刻みが極端に短くなる問題を回避するために、モデルの両極が陸上に配置されるように回転した座標を用いる。

こうして構築された高分解能モデルを用いた温暖化実験としては、第一に単純な二酸化炭素漸増実験を行い、過去の研究との比較を行うとともにモデルの温暖化時の振舞いを確認する。次に、エアロゾルの変化などを含んだ IPCC シナリオ実験を行う。それぞれの、いくつかの異なる初期値を用いたアンサンブル実験を行う。これらの実験の結果から、モデルで再現された温暖化時の気候変化を記述し、メカニズムの検討を行う。

a-2. シミュレーション結果の解析・検証

これまで気候モデルの開発に当たっては、ほとんどの場合気候値すなわち1ヶ月とか1季節にわたる平均状態に着目してモデル性能をチェックして来た。これから開発しようとする大気モデルは T106、T213 といった現在天気予報に用いられているものと同程度の解像度を持ち、日々の天気現象、例えば冬に太平洋側に雪ともたらず「南岸低気圧」のようなものも表現し得る。またそのような現象が温暖化によってどう変わるかまでを調べることによってはじめて実用的な温暖化予測ができる。そこでシミュレーションの結果をこのような日々の天気現象がどのように再現されているかという観点で解析し検証する。

<実施計画>

現在既に T106 のモデルが完成しているので、季節平均 SST を与えて、5～10年間の積分を実行し、日本、アジア地域の日々の気象の現われ方を調べる。また、モデル開発の進行に合わせ、T213、大気・海洋結合モデルの結果も同様に解析し検証を行う。

b. 次世代大気・海洋モデルの開発

次世代大気モデルとして地球シミュレータの性能を最大限に生かした高分解能の大気大循環モデルを開発する。開発するモデルは、非静力学方程式系を力学フレームとした全球をほぼ一様に覆う分解能 5-30km の格子モデルである。平成 13 年度までに完成した正 20 面体格子系による 3 次元全球モデルの力学フレームを基に様々な物理過程モデルを組み込み、現実の気候状態の再現計算を可能にする。

海洋の中規模渦は熱循環、水循環等に重要な役割をはたしている。この渦の効果を基礎方程式に従って、計算し、全球の海洋大循環をシミュレーションすることによって、気候変動のメカニズムの解明が大いに前進すると考えられている。このため高分解能、高計算効率の海洋大循環モデルが必要になる。

<実施計画>

b-1. 3次元全球大気モデルの開発

3次元全球モデルの開発は、まず力学コアとしての性能評価の後、物理過程モデル

を組み込み、さらに現実的な気候状態の再現実験を行う。はじめに、3次元全球モデルの力学スキームの検討を継続する。力学コアの大枠は定まったが、さらに様々なテストによって信頼性を高める必要がある。続いて、力学コアモデルに順次、雲物理、放射、乱流、地表面過程のモデルの組み込みを行う。物理過程モデルを組み込んだ3次元全球モデルによって、様々なテスト実験を行う。以上の作業が終了した後、現実的な気候状態の再現実験を行う。

b-2. 領域非静力学モデルによる新しい力学スキーム・物理過程スキームの検討・開発
次世代大気大循環モデルのサブセットとして、昨年度までに領域非静力学モデルを開発した。このような領域モデルを用いて、次世代モデルに採用すべき力学スキームや物理過程スキームの検討を行う。移流スキーム、山岳の取り扱い、時間発展方法、数値拡散などがある。物理過程については、既存の雲物理過程、放射過程、乱流、地表面過程の性能テストとこれら物理過程の水平5-30km格子の分解能での応用に適切なパラメタリゼーションが必要になる。

b-3. 次世代海洋大循環モデル開発

まず、格子系、差分スキーム等の検討、評価、研究を行い、高分解能、高計算効率を可能にする海洋大循環力学コアを開発する。この力学コアは順次、単純なものから、より現実に近い複雑な気候問題で評価する。また地球シミュレータでのパフォーマンスのチェック及びチューニングの作業を行いながら開発する。

次に、この力学コアを実装した海洋大循環モデルを開発する。この海洋大循環モデルは現実の気候状態の再現実験を通して評価していく。また計算効率は地球シミュレータでチューニングを行いながら評価する。同時に、この海洋大循環モデルで必要になる、大規模データの入出力、画像出力等のためのソフトウェア群を大気大循環サブグループと共同して開発していく。

c. 海洋データ同化システムの開発とそれを用いた再解析および予測実験

本課題は次の二つのサブ課題を含んでいる。

c-1. 水循環海洋の気候変動と構造形成の解明

現在までに4次元変分法により全球季節変動気候値の再解析データを作成し、熱量の南北輸送過程などを明らかにしてきた。今後は、年々から十年スケールの気候変動を、特に太平洋の熱帯と中高緯度領域を対象として明らかにする。

また、太平洋の亜熱帯域に広く存在する亜熱帯モード水や亜寒帯域の中冷・中暖水等の亜表層水塊、および北太平洋中層水に代表される中層水塊との形成と変質過程の解明に取り組む。

c-2. 短中期の変動予測

予測シミュレーションには精度のよい初期値化データを非線形大循環モデルに適用する必要がある。また、予測は確率的に評価することが気象分野では主流となっている。そのため新たなデータ同化手法が必要である。これにより、主にエルニーニョに代表される熱帯変動の予測実験を行い、予測可能性をふまえた短中期の気候変動予測モデルの構築に取り組む。

＜実施計画＞

c-1. 4次元変分法と再解析データによる海洋構造と変動機構の研究

海洋における観測データは断片的で4次元構造解析を行うには不十分である。そのためモデルと観測データの両者を有効に適用する必要がある。まず、力学的合理性を持ったデータを構築するために、高精度の海洋大循環(MOM3)4次元変分法同化モデルを高解像度化することにより、特に熱帯から中高緯度にかけて渦分解再解析データを作成し、熱・水循環の基本構造（特に南北輸送量）とその変動を評価する。個々のエル・ニーニョを特徴づける要因の解析も併せて行う。

また、4次元変分法は感度解析に応用可能である。従来有力な解析手法がなかった海洋構造の解析にこの感度解析適用する。

c-2. アンサンブル・フィルターと変動予測の研究

データ同化により力学的合理性を持った初期値化データを構築することができ、これにより信頼性の高い予測が期待できる。そのために次の二つのアプローチを採る。まず、確率論に基づくデータ同化手法(フィルター、スムーザ)の導入を行う。大循環モデルは非線形であり、この課題を克服するためにアンサンブル法を適用した手法を開発し、期待値のみでなく高精度な確率分布の解析を目指す。これにより、確率予測を可能とする。このモデル研究は超多自由度の問題となるので、地球シミュレータセンターと共同して効率的な超並列アルゴリズム化をはかり、地球シミュレータを中心とする超並列コンピュータを活用して実用化する。

(3) 他の研究計画との関係

地球温暖化実験は、世界各国の研究機関で行われており、その結果は「気候変動に関する政府間パネル(IPCC)」によって5年毎にまとめられている。高解像度結合モデルによる実験(a-1)は IPCC への貢献を目指して東京大学気候システム研究センターおよび国立環境研究所と協力して進めることとしている。次世代大気・海洋モデル開発のうち大気モデル(b-1)は、国内の同様の目的を持った自主的共同研究プログラム、「非静力 2000」(代表者：岩崎俊樹東北大教授)に参加している。

海洋データ同化システムの開発(c)は、全地球海洋の nowcast, forecast に関する国際共同プロジェクトである GODAE のなかで特に Climate コンポーネントの研究に大きく貢献するものである。それとともに、世界気候計画(WCRP)の気候変動と予測可能性研究(CLIVAR)、ならびに全球海洋観測システム(GOOS)や地球気候観測システム(GCOS)にも貢献するものである。また、関連する現場観測や衛星観測を含む国内外との協力、とりわけ文部科学省が推進する日米、日英のデータ同化並びに気候変動関連研究の連携強化につながるものである。