

# モデル統合化研究領域

---

## 1. 後期5ヶ年研究計画概要

### <研究の目的>

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もう一つのミッションである。

### <開発するモデルとデータ同化システムの要点>

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および同化システム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、その質量輸送 (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 (地球システム) の「統合モデル」を開発する。
- (iv) 海洋データ同化に関しては、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するとともに、熱・水4次元分配構造の過去・現在を正確に評価し、変動の機構を明らかにする。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。

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を目標に研究を進めて行く。結合モデル(i)を用いた温暖化実験は、地球温暖化研究領域との共同で、更に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の研究者とも協力して実行する。(iii)の地球システム統合モデルは、2001年まで未着手であり、同年の中間評価で実施を勧告されていたものであるが、2002年度より地球フロンティア全体の協力のもとに開発を開始した。また、(iv)データ同化システムの開発では、これまで海洋データ同化に限って来たが、2002年度より大気・海洋結合システムのデータ同化法の研究も行うこととした。

## 2. 平成15年度研究計画

### a. 結合モデル開発グループ (GL: 松野太郎)

#### a-1. 高解像度結合モデルによる温暖化実験

(担当: 江守正多、鈴木恒明、鈴木立郎、坂本天、松村伸治)

2007年に発表されるIPCC第4次報告書に貢献する温暖化実験を確実に行うため、平成14年度に最終目標より一段分解能の低いT106大気モデルと経度方向 $1/4^\circ$ ×緯度方向 $1/6^\circ$ の海洋モデルを開発し、海洋モデルの北側の座標の極をグリーンランドに移して、両モデルを結合させ、テストランを行った。物理的パフォーマンス、計算時間とも、最小限の必要条件をクリアしたので、今年度は現状気候のシミュレーション、20世紀気候変動再現ラン、更に温暖化ランを実行する。

#### a-2. モデルの改良

(担当: 栗原宜夫、佐藤正樹、鈴木恒明、Zhang Hua、鈴木立郎、松村伸治)

上記のモデルはIPCC第4次報告書に向けての時間的制約の下で「見切り発車」したものであるため、平行してモデルの改良と高解像化の準備を進める。大気モデルでは10~30km格子に適合した対流パラメタリゼーションの開発や放射スキームの改良、鉛直高解像度化などを行い、海洋では底面境界層の取り扱いの改良などを行う。

#### a-3. 大気モデルの気候再現性テスト

(担当: 二宮洗三、榎本剛、松村伸治)

大気モデルの性能テストとして梅雨をはじめアジア域の特色ある気象についてモデルの結果を解析し、実際との異同を調べる。

### b. 次世代モデル研究グループ (GL: 田中幸夫、SL: 佐藤正樹)

#### b-1. 次世代大気モデル (担当: 佐藤正樹、富田浩文、那須野智江、榎本剛、伊賀晋一)

水平格子間隔5km以下の非静力学大気モデルを目標に開発を進めて来た。平成14年度迄に20面体を基礎にした新しい格子系の開発、保存則を満たす新しい非静力学方程式差分形式の導出を終え、14年度には両者を組み合わせた乾燥大気モデルを地球シミュレータ上でテストした。格子間隔120km迄の分解能で大循環を模したHeld-Suarezテスト実験を行って物理的パフォーマンスを確認し、また格子間隔7km迄の10日積分を実行してモデルの安定性・パフォーマンスを確認すると共に、計算速度も見積もった。平成15年度は、更に高解像度化してパフォーマンスのチェックと計算の効率化を行うと共に、諸物理過程を導入して本格的な大気モデルとする。特に、水蒸気と雲物理過程を組み入れて「全球雲解像モデル」を作り上げる。

### b-2. 次世代海洋モデル（担当：田中幸夫、津川元彦、坂下雅秀、三村裕一）

平成14年度までに、次世代の高解像度海洋モデルの基礎として立方体をもとにした準一様格子を採用する方針をとり、その一つである“conformal”立方格子を用いて浅水モデルを開発して来た。しかし、この方法は高解像度にした時格子間隔の一様性が損なわれるので13年度末に開発を中止し、別の方法を探ることにした。幅広く他の方法を検討した結果、同じ立方体格子で、格子の面積をできるだけ一様にする一般化座標を用いることを決めた。この座標は局所直交性を持たないので、いろいろな工夫をして精度の良い差分オペレーターを作り、また、浅水方程式でエネルギー、エンストロフィーを保存するスキームも案出した。これに基づいて Williamson のテスト実験を行い、パフォーマンスと保存性の確認が出来た。他方、緯度・経度格子を用いた3次元海洋モデルを別途開発し、地球シミュレータ上での計算効率の向上を図った。平成15年度はこれら予備実験の経験を合わせ、等面積立方体格子による3次元海洋モデルを作り上げる。

### b-3. 非静力学大気モデルによる実験（担当：佐藤正樹、那須野智江）

全球非静力学モデルの開発（b1）を進める傍ら、既存の気象庁・気象研のモデルを用いて熱帯域を対象に広領域（2000km程度）での対流雲クラスターのふるまいについての実験を行って来た。平成15年度も引き続き熱帯での対流およびそれを含む大規模擾乱のシミュレーションを行い、雲クラスターの構造とその形成・維持機構の解明を行う。同時に1km格子の雲解像モデルで得られた知見を10~30km格子での対流雲パラメタリゼーションの開発に役立てる。

### c. 地球システム統合モデル開発グループ（SL：河宮未知生）

（担当：近藤洋輝、河宮未知生、渡辺真吾、江守正多、鈴木恒明、鈴木立郎、松野太郎）

平成14年度より地球フロンティア全体にまたがるプロジェクトとして地球システムの統合モデルの開発に着手した。これは、これまで気候モデルと呼ばれて来た大気・海洋・陸域の物理的状態（気温、海流、積雪 etc.）に加え、大気・海洋の化学組成、更に陸域生態系（植生と土壌）を含む全球にわたる炭素循環をも対象として地球環境全体の変動をシミュレートするモデルで、地球フロンティアの目的とする「地球変動予測」の手段となるものである。それ故、2001年の中間評価においても統合モデリングの実施が勧告されていた。

平成14年度は地球フロンティアの各領域にまたがる開発チームを出発させ、各要素モデルの現状と統合化への戦略を検討した。平成15年度においては、陸域・海洋各炭素循環モデルの開発及びその結合に着手する。また、既存の大気組成モデルを統合モデルに組み込めるよう適切な簡略化と成層圏化学の導入を行う。

### d. データ同化グループ（GL：淡路敏之、SL：杉浦望実）

#### d-1. 大気・海洋結合システムのデータ同化法開発

（担当：淡路敏之、杉浦望実、増田周平、James Annan、五十嵐弘道、望月崇、石田信浩、

美山透）

従来の海洋データ同化に加え、平成14年度より大気・海洋結合システムのデータ同化手法の開発に着手した。ここでは、大気・海洋相互作用を考慮しながら、観測値にも

整合した統一的な気候変動データセットを作ることを最重要課題としている。本年度は、それを実現するシステムである結合モデルを用いた四次元変分法データ同化システムを構築する。そのために、既に開発済みの海洋四次元変分法同化システムを核として、シミュレーション機能を大気海洋結合モデルに発展させるとともに、大気及び海氷のアジョイントコードなどのコンポーネントを整備する。さらに、これらを組み合わせて、最適化問題を解くシステムを構築する。

#### d-2. 四次元変分法による海洋再解析データの作成と解析

(担当：淡路敏之、杉浦望実、増田周平、James Annan、沈一揚、美山透)

昨年度に計算効率を最適化し経年変動が考慮できるように改良した海洋四次元変分法データ同化システムを使って、経年変動が顕著で海洋データが比較的充実している1990年代を対象として、大気再解析データを初期推定値として海洋の再解析を行なうことでこれを修正し、1990年代の統一的な海洋データセットを作成する。また、そのデータを用いて物理的な解析を行ない、エルニーニョや水塊形成等の現象を検討する。さらに、ここで得た物理的知見や同化技術を結合モデルによる同化やフロートデータを用いた同化の研究に役立てていく。

#### d-3. 四次元変分法による海洋再解析データの高解像度化

(担当：淡路敏之、杉浦望実、増田周平、James Annan、沈一揚、美山透)

水塊形成過程などをより詳細に調べるためには混合層過程や渦輸送過程をはじめとする時空間スケールの小さな現象の再現性を、高解像度化することによって高める必要がある。それを実現するために昨年度は、北太平洋 1/4 度、鉛直 45 層程度の北太平洋領域を対象とした海洋データ同化シモデルを構築した。本年度は、これを用いて四次元変分法による北太平洋高解像度再解析データを作成し、北太平洋亜熱帯モード水や中層水をはじめとした水塊の形成過程の物理的検討を行なう。また、ここで得た物理的知見や同化技術を高解像度の結合モデルによるデータ同化の研究に役立てていく。

#### d-4. アンサンブルカルマンフィルタの実際的応用

(担当：淡路敏之、杉浦望実、増田周平、James Annan、沈一揚)

昨年度開発した確率過程の理論に基づいたデータ同化手法(フィルタ、スモータ)を実際の海洋モデルに適用して、アンサンブルカルマンフィルタ法による海洋同化システムを構築し、同化実験を行なう。ここで得た物理的知見や同化技術を結合モデルによる同化の際のコスト関数中の誤差共分散行列の改良等につなげていく。

### 3. 共生プロジェクトとの関連

共生プロジェクト課題1における“高解像度結合モデルによる温暖化実験”、課題2における“地球システム統合モデルの開発”、課題7における“大気・海洋・結合システムのデータ同化手法の開発”に参加し、地球シミュレータを利用していく。

### 4. 期待される成果とその意義・社会での役割

本研球領域のミッションは新しい気候モデル、データ同化システムを作ること及びそれを用いて地球温暖化実験を行ったり、再解析データセットを作ることである。従って「1. 後期5ヶ年研究計画概要」に記した目標(i)~(iv)に応じて具体的なプロダクツがあ

る。それぞれの意義・社会への貢献は次の通りである。

(i) 高解像度大気・海洋・陸面結合モデルの開発とそれを用いた地球温暖化予測実験

現在開発中の結合モデルは目標より一段階低解像度のものであるが、それでも世界の他のグループと比べ最も解像度の高いものであり、それによる地球温暖化実験は、海洋循環の振る舞いに関して信頼のおける結果が期待される点、および全球モデルで地域的气候変化が得られる点で、これまでにない温暖化予測情報を提供することになる。いずれも IPCC 第3次報告書（2001年）において今後の重要課題とされているものである。

(ii) 次世代大気モデル、海洋モデルの開発

準一様格子を用いた全球雲解像大気モデルは、完成すれば大気モデリング、数値天気予報の歴史に新しい時代を開く画期的なものとなる。現在の開発状況から、遅くとも2004年中に3.5km格子のモデルで24時間予報が3~4時間で可能な事を示せるであろう。気象庁でも次々期のコンピューター更新（2011年と想定）以降の数値予報モデルに関連して興味をもっており、今後の展開によって世界に大きなインパクトを与えるに違いない。対流雲システムを直接表現する大気モデルは、日本を含むアジア地域の気象の予報と研究に対して特に大きな貢献をするであろう。海洋モデルも、現在、渦解像モデルの必要性が認識され、そのために様々な工夫がされているものの、どうしても従来の延長を脱し切れないうちにある事を見ると、最もすっきりした立方体格子による高解像度モデルは、次世代の標準になる可能性がある。

(iii) 地球システム統合モデル

これまで（IPCC 第3次報告書）の地球温暖化予測においては、気候変化（温暖化）が炭素循環に与える影響が取り入れられていない。最近、気候モデルに炭素循環を組み入れた計算がイギリスとフランスの研究グループで行われ、その結果に大きな差が現れて問題となっている。この問題の解決も含め、これからの温暖化予測には炭素循環はじめ地球環境全体の変化を相互に辻褄の合った形で予測する統合モデルによるシミュレーションが求められる。次の IPCC 報告にはこのような形での温暖化予測が世界の主要センターから提出されるであろう。現在、日本で統合モデルを作る計画は本プロジェクトのみである。世界全体の中でも地球フロンティアの特色と言える総合性を生かして総合的温暖化予測に大きな貢献ができるであろう。

(iv) データ同化研究により観測とシミュレーションを統合して、海洋（または大気海洋結合系）の状態を表す高精度かつ整合性のあるデータセットを得ることができる。ARGOや衛星計測等の地球観測プロジェクトの成果を最大限に引き出す新手法であり、これによるデータセットは海洋や気候等の科学研究に有用であるのみならず、漁業や海上物流・保安等の実用分野にも有益である。すなわち、海洋データ同化システムは、幅広い社会的波及効果のある海況情報提供システムである。