

課題名	RF-061 Super-GCMの開発およびそれを用いた温暖化時のメソ気象現象変調に関する研究		
課題代表者名	渡部雅浩（北海道大学大学院地球環境科学研究院地球圏科学部門大気海洋物理学分野）		
研究期間	平成18-19年度	合計予算額	19,304千円（うち19年度 9,307千円） ※上記の合計予算額には、間接経費4,455千円を含む
研究体制	<p>(1) Super-GCMの開発（北海道大学）</p> <p>(2) 雲解像モデルを用いた雲物理量の確率分布に関する解析（名古屋大学）</p> <p>(3) GCMにおける雲パラメタリゼーション改良とSuper-GCMを用いた気候変化シミュレーション（独立行政法人国立環境研究所）</p> <p>(4) 雲・降水を介した多重スケール相互作用の評価に関する数値的研究（東京大学）</p>		
研究概要	<p>1. はじめに（研究背景等）</p> <p>IPCC第4次報告書(AR4)においては、地球温暖化時の大規模な気候変化予測とともに、地域的な影響および、台風や集中豪雨などの極端なメソスケール(数km程度)の気象現象の変化に関する予測に進展が見られる。特に後者については、地球シミュレータを活用して高解像度の気候モデル(Global Climate Model、GCM)によるシナリオランを行った日本の研究コミュニティの貢献が大きい。しかしながら、高解像度とは言えGCMの格子は未だ100km程度の間隔であり、格子内部の雲や降水システムは直接表現できないために、パラメタリゼーションと呼ばれる方法でだまかに計算されている。このことが、モデルごとに異なる温暖化シナリオを生じるという不確定性の主要因の一つであり、GCMの格子が数倍程度細かくなっても本質的な状況は変化しない。</p> <p>現行よりも高精度の地域的シナリオ作成が可能なアプローチとして、GCMの場を初期・境界条件としてオフラインで領域気候モデルによる計算を行い、細かな構造をシミュレートする力学的ダウンスケーリングがある。これは気象予報では既に実用化されているが、時間スケールの長い気候予測においては、GCMに領域モデルをオンラインで埋め込む双方向ネスティングの実現が重要である。また、雲や降水に関わる多重スケールの相互作用を計算するのに、ネスティングが最適の手法であるかどうかの検討も必要である。最近、米国の複数のグループは、スーパーパラメタリゼーションあるいはマルチスケール・モデリングフレームワーク(Multi-scale Modeling Framework、MMFと略)という、より新しいモデリング手法を気候研究で提案している。これは、格子間隔数km程度の雲解像モデル(Cloud Resolving Model、CRM)をGCMの各格子に双方向的に埋め込むもので、ネスティングとは概念的に異なるモデルシステムである。MMFは未だ試行錯誤の段階にあるものの、気候システムにおける雲形成・多重スケール相互作用の問題に対して有効なアプローチを提供するのみならず、これを用いた温暖化実験から得られるであろう、信頼性の高いメソ気象変調予測という社会的意義のある成果をもたらす大きなポテンシャルを秘めている。残念なことに、MMFにもとづく気候モデリングへの取り組みは国内では皆無であり、IPCC AR5を見据えて開始しなければならない緊急性を帯びている。これが、本研究課題の背景である。</p> <p>2. 研究目的</p> <p>上記の背景を踏まえ、本研究はMMFにもとづく気候モデルの開発および温暖化予測への応用を目的とする。但し、東西-鉛直2次元のCRMをGCMの全ての格子に独立に埋め込む米国流のMMFと異なり、本研究では、ネスティングとMMFを繋ぐよりフレキシブルなシステムの開発を目指す。すなわち、GCMの1格子を単位としてCRMを埋め込むことにより、任意の領域でのネスティングあるいはスーパーパラメタリゼーションを可能にするFlexible Nesting (FlexNest*)と呼ぶ新しいモデルの枠組である(図1)。FlexNestを用いた本格的な温暖化シミュレーションには地球シミュレータ級の計算機を必要とするため、本研究計画には含めず、モデルの開発およびその周辺で重要となる基礎課題に焦点をあてる。FlexNestは効率的なMMFだが依然計算機の負荷が大きく、全球のほとんどの場所では降水現象は従来通りGCMにより表現されるため、FlexNestの開発とあわせてGCMにおける雲・降水パラメタリゼーションの改良(サブテーマ(3))が重要である。</p> <p>上記の通り、本研究にはモデル開発および温暖化研究への応用という2つの側面がある。モデル開発について、本研究の目的とするFlexNestには、従来のモデルと比較して次のような新奇性</p>		
* 課題名にあるsuper GCMに代わる、より適切な呼称として成果発表および本報告書ではこれを用いている。			

がある。

- ・MMF的側面：気候システムの多重スケール相互作用を陽に扱えるシステムで、継ぎ当ての領域を自由に設定することにより、対象とする地域・現象を特定してより安価な計算機資源でのシミュレーションが可能である。
- ・ネスティング的側面：1方向あるいは双方向のネスティングと同様の計算ではあるが、ネスティングと異なり、GCMとCRMの扱う現象の空間スケールに大きなギャップがあっても、直接シミュレーションが可能である（ネスティングでは安定な計算のために煩雑な多重構造化が必要）。温暖化研究への応用という側面では、日本周辺域のメソスケール気象現象に着目し、継ぎ当て領域として、図1のようにフィリピン海付近から日本列島周辺までを考える。これは、特に社会的影響の大きな夏季の顕著な気象現象を想定した領域設定である。

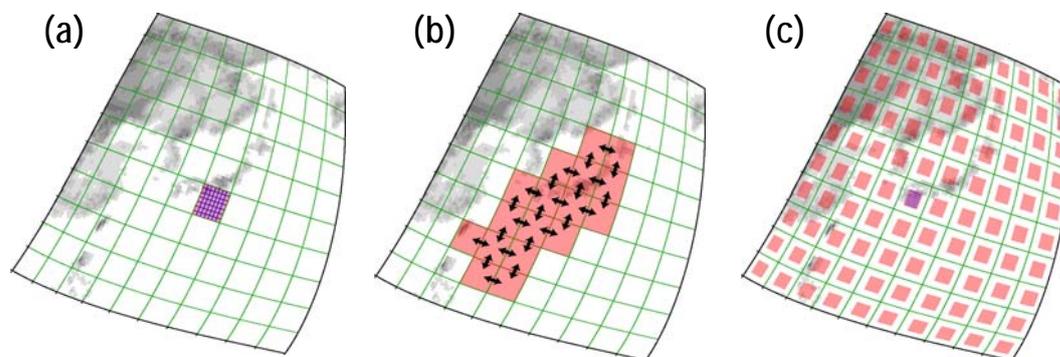


図1：FlexNestの概念図。細いメッシュはGCMの格子(100～200km)を、陰影領域はそこに埋め込まれたCRM(格子1～5km)を表す。FlexNestでは、(a) CRMの領域単位をGCMの1格子で定義することで、(b) 複数のCRMを用いて自由な領域でのネスティング、あるいは(c) スーパーパラメタリゼーションどちらにも適用可能である。

### 3. 研究の方法と結果

以下に、各サブテーマの研究手法および平成19年度の成果を簡潔に述べる。これらのサブテーマは、相互に連携・相互作用しながら各々の目標達成を目指す。

#### (1) Super-GCMの開発

本研究課題の提案するFlexNestの開発を担当する。モデル自体は広い範囲の気候研究へ適用できる一般性をもつが、前節で述べたように、温暖化シナリオを想定した応用を前提とするので、図1に模式的に示したように、格子間隔100～200km程度のGCMの中で、日本周辺およびそこへの水蒸気供給源であるフィリピン海付近までの領域で、各格子に双方向的に格子間隔数kmのCRMを埋め込んでFlexNestを実装する。GCMおよびCRMは、参画研究者が各々開発に携わってきた東京大学・国立環境研究所・海洋開発研究機構の大循環モデルCCSR/NIES/FRCGC AGCMと、名古屋大学で開発されている雲解像モデルCRESSを用いる。双方とも実績のある数値モデルであり、スーパーコンピュータ用に並列化されている。

平成18年度にFlexNestの物理的デザインを決定し、高速計算のためのコード設計を考案して、基本部分であるCRMの座標系変更・多重並列処理・両モデルの結合モジュールなどの開発を終えた。これにより海上での1方向ネスティングとしては動作するようになったので、平成19年度はさらに実用段階へ向けて、2方向計算の実装、細かい地形を与えたときの計算、スーパーパラメタリゼーションの実装などを行った。年度後半では、検証実験として2002年以降の梅雨期(6月から7月前半)のシミュレーションを、格子250km相当のAGCMと格子5kmのCRMを組み合わせ実行した。日本周辺領域をカバーするため、64のCRMを図1bのように連結して解く。図2はその結果で、2005年の梅雨期で平均した降雨量について(左)人工衛星TRMMのデータと(中)AGCM、および(右)CRMの計算を比較している。AGCMではわずかに梅雨前線らしきものが見てとれるに過ぎないが、CRMでは非常にシャープな前線に伴う強い降雨がシミュレートされている。領域は複雑な形状をしており、ネスト比が1:50と大きいにもかかわらず、境界でのノイズは発生せず、スナップショットではメソ降水システムの発生・発達・移動がよく表現されていた。

FlexNestを2方向で(すなわちAGCMがCRMを駆動するだけでなく、CRMの場がAGCMへもフィードバックする)計算することの意味は、①AGCMでは表現できない強い(局所的な)降水が表現できる、②降水分布が変わることにより大規模な大気循環場も変化する、という2点にある。このうち、①については図3にその結果を示した。格子の粗いAGCMでは、3ミリ/時以上の強い降雨イベントが生じないが、ダウンスケールしたCRMでは50ミリ/時までの強くめったにないようなイベントの頻度が表現される。2方向で計算すると、この降雨頻度分布がAGCMでも表現できるようになることが図からわかる。

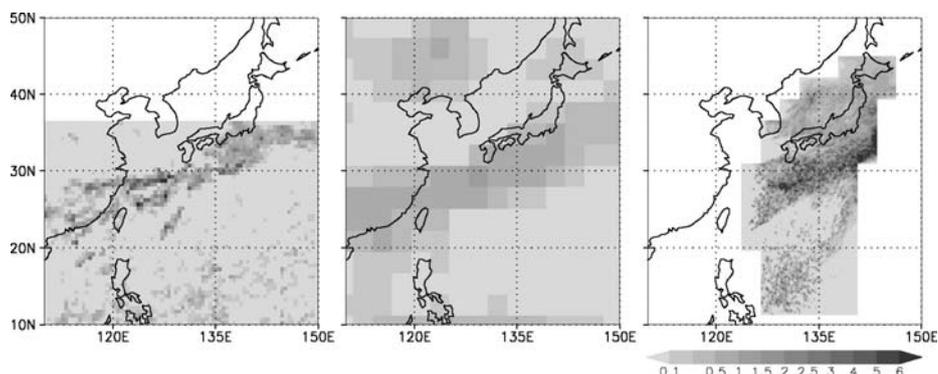
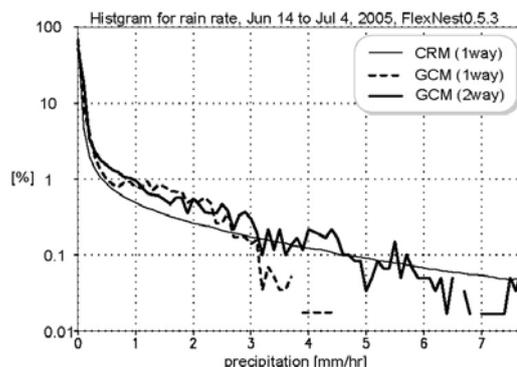


図2：(左)人工衛星による2005年6月の降水量、FlexNestの1方向ダウンスケーリングで行った同時期の(中)GCMおよび(右)CRMにおける降水量の分布(単位ミリ/時)。CRMでは、GCMで表現できない梅雨前線での強い降水がシミュレートされている。

図3：FlexNestで行った、日本周辺域での降水量の頻度分布。破線：GCM、細実線：1方向ネスティング時のCRM、太実線：双方向ネスティング時のGCM。双方向で計算すると、従来強い降水が表現できなかったGCMでも、4ミリ/時を越える雨が降るようになる。



また、図示しないが、2方向で計算を行うことでAGCMにおける梅雨前線が強化され、それに伴う潜熱放出が遠く北米の大気循環まで影響することがわかった。観測データを解析すると定性的によく似た遠隔作用が見られることから、こうした過程を全球モデルが表すことが妥当であると考えられる。本サブテーマでは、年度内にスーパーパラメタリゼーションを含むその他いくつかの数値実験を行った。

## (2) 雲解像モデルを用いた雲物理量の確率分布に関する解析

温暖化評価に用いられるGCMにおいて、大規模凝結過程と呼ばれる格子スケールでの雲の生成・消滅過程は大きな不確定性を有している。大規模凝結過程では、格子の代表値として陽に計算される総水量(水蒸気量と雲凝結量の和)に加えて、格子内部では、総水量がある確率密度分布にしたがって広がりを持つと仮定し、格子スケールの凝結水量や雲量などを計算する。しかし、この確率分布がどのように決定されるかは、実際には分かっていない。そこでサブテーマ(2)では、日本周辺を対象とした水平解像度5 kmのCRMを用いて毎日の気象シミュレーションを実施し、1年分の計算結果からGCMの格子スケールでの総水量の平均値と確率密度分布を実際に求めた。その結果、GCM格子に相当する約250km程度の空間では、総水量の確率密度分布は標準偏差が1.2 g/kgの正規分布に近い形状であることが示された。これらの特徴は緯度毎、高度毎には変化が無かったが、海洋上と陸上の格子点においては形状が異なることも分かった。また、季節別では冬季にのみ標準偏差の値が小さいという結果が得られた。今回示された確率密度分布は一つの例であるが、今後、これらの確率密度分布についてより詳しい解析を進めることで、サブテーマ(3)で進められている大規模凝結過程の計算手法改良に資する情報を提供できると考えられる。

## (3) GCMにおける雲パラメタリゼーション改良とSuper-GCMを用いた気候変化シミュレーション

FlexNestであれネスティングであれ、対象とする現象に影響する範囲を考慮して領域の設定を行うが、実際にはより広い空間スケールに誤差があれば影響を受ける。従って、より信頼性の高い計算を行うには、GCMにおける各種物理過程、特に雲の表現向上が不可欠である。そこで、サブテーマ(3)では今年度の課題として、GCM中の雲表現に対する気候感度についての科学的知見を得ることを目標として2つの研究を実施した(図1参照)。

大気中の温室効果気体増加に対する非対流性の薄い雲の応答は結果に大きく影響するにもかかわらずGCM間で異なっている。その仕組みを理解するために、サブテーマ(1)で用いているGCMと、英国

のGCMを比較対象として選び、温暖化シミュレーションにおける雲の実体である雲水・雲氷の変化を詳細に調べた。その結果、熱帯と中緯度の混合雲（液相と固相の混じった雲）の温室効果気体増加に対する応答に、2つのGCM間で顕著な違いが現れていることが判明した。違いを生じるメカニズムを理解するために、雲水収支解析という手法を新たに提案し、それを用いた結果から、応答の違いが氷雲の昇華過程の取り扱いに起因することが示唆された。上記の結果は、改良すべき雲表現を特定したという意味で重要であり、また、気候変化時の雲の応答メカニズムを理解する上で雲水収支解析が有効であることを示している。今後、解析対象をAR4へ結果を提出した他のGCMに拡大することで、雲の気候変化へのフィードバックの不確実性低減に寄与することが期待される。

2つ目の研究として、上記の解析結果を参照してGCMの雲表現に関する新しい手法をサブテーマ(1)と協力して考案した。水雲であれ氷雲であれ、格子の粗いGCMでは、格子平均の気温や水蒸気量のみから雲量（凝結する水蒸気の量に比例する）を計算すると非現実的な雲の分布になる。そこで、格子内部に水平方向に気温・総水量の確率分布を仮定して、格子内部でどの程度の凝結が生じるか、すなわち格子平均の雲量および雲水量を求めるという方法をとっている（サブテーマ(2)の項参照）。確率分布には時空間的に変化しない確率密度関数を与えているが、現実には、格子内部の積雲対流や乱流などの影響により、確率分布は時空間的に変動する。今年度、サブテーマ(3)では、平均、分散、および歪度で決まる確率密度分布を予報するような雲の表現方法を導出することを試み、成功した。さらに、GCMにこの手法を取り込んで初期のテストを行い、雲および降水量の分布に顕著な改善が見られることを確認した。このような雲のパラメタリゼーションはまだまだ途上段階のものであり、この開発がすすめば気候モデルの高度化の一端を担う先端的な成果になると期待される。

#### (4) 雲・降水を介した多重スケール相互作用の評価に関する数値的研究

サブテーマ(4)では、既存の大気海洋結合大循環モデルに既存の領域気候モデルを双方向ネスティングで組み込むシステムを開発し応用するとともに、サブテーマ(1)で開発されるFlexNestとその結果を比較することに主眼をおく。平成18年度にはこのネスティングシステムの開発と整備を行い、基礎的な調査として、大循環モデルと領域モデルの解像度比を変えたデモンストレーション実験を行った。数値積分中で温帯低気圧が領域内を通過したケースに注目した。その結果、このようなネスティングシステムにおいては、解像度の比は1:5程度にしておくのがせいぜいであることがわかった。例えば、1:20にしてしまうと、前線の構造を飛び越えて小地形性の降水を計算するため、リアリティーが低く、さらに計算機不安定の原因となりかねないことがわかった。さらに、システムは解像度比が1:5である限りにおいて、比較的安定に積分が可能であり、領域モデルをアンデス山脈やインドネシア多島海など熱帯域をネストすることも可能であった。平成19年度は夏季モンスーンの卓越する南アジア域に適用し、1方向と双方向計算の結果を比較することで、大規模なアジアモンスーンの降水分布に小さなスケールの地形に起因する循環場との相互作用が影響していることを明らかにした。このような大気海洋結合モデルと領域モデルの双方向ネスティングの開発は世界的に見ても例の少ない新奇性のあるものであり、これを端緒として気候形成・気候変動研究の新たなアプローチの見通しを示したことがこのサブテーマの成果である。

## 4. 考察

本課題は、比較的短い研究期間でモデルの開発と応用を行う計画で、課題採用前には「本当にできるのか」と危惧する意見も見られたが、研究協力者との円滑な連携もあり、モデル開発に関しては順調に期間内で達成することができた。今後、より長期の数値実験やCRMの適用領域を変えた実験を行うことで、FlexNestは温暖化研究において全球気候モデルを補う様々な応用研究へ役立つと考えている。サブテーマ(2)と(4)は主に本課題に関連する科学的知見の獲得を目標としている一方、サブテーマ(3)で行われているGCMの雲パラメタリゼーション改良の成果は、AR5で用いられる予定の地球システムモデルに組み込む作業が進んでいる。本課題では、これとFlexNestの開発が同時進行であったために両者を組み合わせることがしなかったが、今後融合することは充分可能である。

当初計画にあった、既存の温暖化シナリオをベースにしたFlexNestのシミュレーションは途中まで進めたものの、技術的な問題（モデルの計算機種依存性）とAR5への道程を考慮した際の重要性という観点から、代表者の判断で中止した。これは、この2年間で次の気候シナリオ作成が既に本格的に進んできており、古いAR4の結果に基づいて拙速で実行してもインパクトに欠けるという事態になってきたためである。それよりも、サブテーマ(3)の成果を活かしたAR5本実験を行い、それをもとにFlexNestで温暖化時のメソ気象現象変調についてより精細な情報を得るということが時期的・科学的によいと考えている。合わせて、FlexNestのさらなる修正・発展を進めながら、現在気候および前世紀の気候・気象変動に関するさまざまなシミュレーションを行い、そのメカニズムを探求することが必要であろう。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

温暖化に伴う大規模場の気候変化は、予測に用いる複数のGCM間で収束しつつある(すなわち共通の結果を示す)側面もあるが、AR4においても依然として大きなばらつきが見られる部分も残っている。サブテーマ(3)の報告で分かるとおり、気候予測の不確定性の主要因がパラメタリゼーションにあることは広く認識されている。本研究では、気候予測の不確定性は重点的な課題とはしないが、GCMが小規模な雲・降水過程およびその大規模場との相互作用をどう表現するかが不確定性に密接に関わっているため、FlexNestの開発は、こうした不確定性の源を特定し、より確実な大規模場の気候予測を行うために重要な研究手段を提供することになると考えられる。

### (2) 地球環境政策への貢献

現在のGCMに精通している気候モデラーは、自らの計算する温暖化予測データにおいて、総観規模よりも大きな空間スケールはともかく、モデルの格子スケールの予測値を信頼することの危険性を承知している。一方、気候予測データを利用する側では、ハザードマップ、生態系影響評価、水資源管理、一次産業へのインパクトなどを推定する際に、格子スケールの情報に意味があるという前提に立つ。FlexNestを用いた温暖化シミュレーションは、少なくともMMFを適用した領域内でこのジレンマを解決し、地球環境政策、特に温暖化に対する適応策の立案・提言にあたって有用な一次資料を提供する。

本課題は2年間という限られた期間で遂行したためにやり残しもあり、従って今後の継続が重要である。サブテーマ(1)～(3)の成果は、文科省21世紀気候変動予測革新プロジェクトの課題A2-1(近未来予測)およびA4-4(CRM高度化)に活かされており、今後の発展が期待できる。また、サブテーマ(4)は環境省地球環境研究総合推進費S-5(4)で継続的に進められることになっている。本課題の成果は直ちに地球環境政策へ貢献するものではないが、革新型課題として萌芽的な成果を得ることは充分達成したと考えており、今後のAR5に至る日本の地球環境研究にとって必要な布石となると期待している。

## 6. 研究者略歴

課題代表者：渡部雅浩

1971年生まれ、東京大学大学院理学系研究科地球惑星物理学専攻博士課程修了、理学博士、現在東京大学気候システム研究センター准教授

主要参画研究者

(1)：渡部雅浩（同上）

(2)：篠田太郎

1966年生まれ、北海道大学大学院 理学研究科地球惑星科学専攻博士後期課程修了、理学博士、現在 名古屋大学地球水循環研究センター専任助教

(3) 1)：江守正多

1970年生まれ、東京大学大学院総合文化研究科博士課程修了、学術博士、現在 独立行政法人国立環境研究所地球環境研究センター温暖化リスク評価研究室室長

2)：小倉知夫

1974年生まれ、東京大学大学院理学系研究科地球惑星物理学専攻博士課程修了、理学博士、現在 独立行政法人国立環境研究所地球環境研究センター温暖化リスク評価研究室研究員

(4)：稲津將

1977年生まれ、北海道大学大学院地球環境科学研究科博士課程修了、地球環境科学博士、現在 北海道大学大学院理学研究院准教授

## 7. 成果発表状況（本研究課題に係る論文発表状況。）

とくに記載すべき事項はない。