

(1) Super-GCMの開発

北海道大学大学院地球環境科学研究院<sup>1</sup>/東京大学気候システム研究センター

渡部雅浩

<研究協力者> 榊中電C T I 環境情報部 榊原篤志  
長谷川晃一

平成18～19年度合計予算額 11,289千円

(うち、平成19年度予算額 5,027千円)

※上記の合計予算額には、間接経費2,605千円を含む

[要旨] 2013年以降のIPCC第5次報告を見据えて、地球温暖化の地域的な影響、特に集中豪雨などの強い気象現象の頻度・強度などの統計量の予測が重要になってきている。本研究では、そのような要望に資する、FlexNestと呼ばれる新しい気候モデルの枠組みを開発し、FlexNestが日本周辺域での高精度気候変化シナリオ作成に有用であることを示すことを目的とする。本サブテーマ1は、モデルの開発を担う。具体的には、全球気候モデルの格子を最小単位として、任意の不規則な領域に、個々の雲を表現できる微細な気象モデルを双方向的に組み込むという内容である。平成19年度は、本課題で目標としたFlexNestの開発を全て終え、モデルの検証および有用性を示すために梅雨期の日本周辺のシミュレーションを実施して結果を解析した。

[キーワード] 全球気候モデル (GCM)、雲解像モデル (CRM)、マルチスケールモデリングフレームワーク (MMF)、FlexNest、高精度温暖化シナリオ

## 1. はじめに

IPCC第1作業部会のまとめた第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、集中豪雨などのsevere weather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く、21世紀末までの豪雨頻度の変化をいち早く予測している。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・降水システムの表現は粗いパラメタリゼーション<sup>2</sup>によっている。温暖化で変化する気候環境のもとでの社会の適応策を適切に策定するには、数kmスケールのメソ気象現象の統計量に関するより信頼性の

<sup>1</sup> 平成20年3月末まで兼務

<sup>2</sup> 格子内部の直接計算できない現象の効果を集団的に考え、格子の計算できる場の量を用いて表すこと。パラメタリゼーションの具体的な内容は素過程の物理的な知見にもとづくが、これはあくまで粗い近似であり、近似の有効性自体もよく分かっていない過程もある。

高い長期的予測が重要であり、そのためには雲システムを陽に表現できる非静力学GCMが必須の道具となる。ところが、こうした次世代GCMはあまりに計算コストが高く、少なくとも今後数年間で現実的な気候シミュレーションが行えるようになる見込みは非常に低いという問題がある。

現行および次世代型GCMの間のギャップを埋める手段として、GCMの場を初期・境界条件とした領域気候モデルで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、気象予報の現場では既に実用化されているが、メソスケール現象が大規模場にフィードバックしないために多くの問題点が挙げられる。このことから、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（これについてはサブテーマ4で扱う）。これ自体も意味のある試みであろうが、最近米国の複数の研究グループは、スーパーパラメタリゼーションという、より新しいモデリング手法を提案している。これは、格子間隔数km程度で個々の積雲を直接計算できる雲解像モデル(Cloud Resolving Model, CRM)をGCMの各格子に双方向的に埋め込み、一種のパラメタリゼーションとして用いるという考えである。元来、現象の空間スケールが全球から1km以下の広い範囲におよぶ気象のシミュレーションでは、異なる空間スケールの場を異なる方法で表現するマルチスケールモデリングが有効である。そのため、スーパーパラメタリゼーションはいわゆるマルチスケールモデリング・フレームワーク (Multi-scale Modeling Framework, MMF) と総称されるようになってきている。気候研究におけるMMFは未だ試行錯誤の段階にあるものの、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、SP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、本研究の提案に至った背景である。

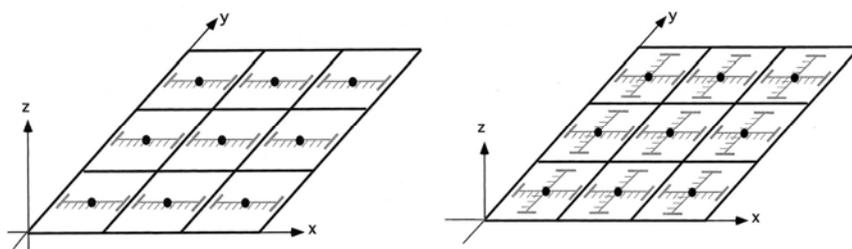


図1：GCMにCRMを組み込むMMFの模式図。メッシュはGCMの格子を、その中の目盛りつきの横棒は2次元のCRMを表す。全球の全ての格子に一樣に組み込むために（計算機資源の制約上）3次元のCRMを使うことができず、2次元のCRMをGCMの各格子に1つ（左図）あるいは東西南北に2つ（右図）組み込んで、それがGCMの格子の場を代表すると仮定する。Randall et al. (2003)より。

## 2. 研究目的

上記の背景を踏まえ、本研究はMMFの開発およびその温暖化予測への応用を目的とする。但し、本研究課題では、独自の概念にもとづいてMMFを開発する。米国で開発されているMMFは、全球の全ての格子にCRMを1つずつ埋め込んでゆくもので、計算機資源の制約からCRMは3次元ではなく2次元のものを用いている（図1）。山岳が少なく気象擾乱の構造が南北には比較的似ている熱帯ではこの方法は有効であろうが、中緯度の複雑な形状の雲システムには不適切である。さらに、微細な山岳の効果を表現することができない。このことと、1~100kmスケールの気象現象が影響する空間範囲が有限（せいぜい数千km）であることを考慮して、本課題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<sup>3</sup>)と呼ぶ新しいモデルの枠組である（図2）。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が重要である（これについてはサブテーマ(3)で述べる）。

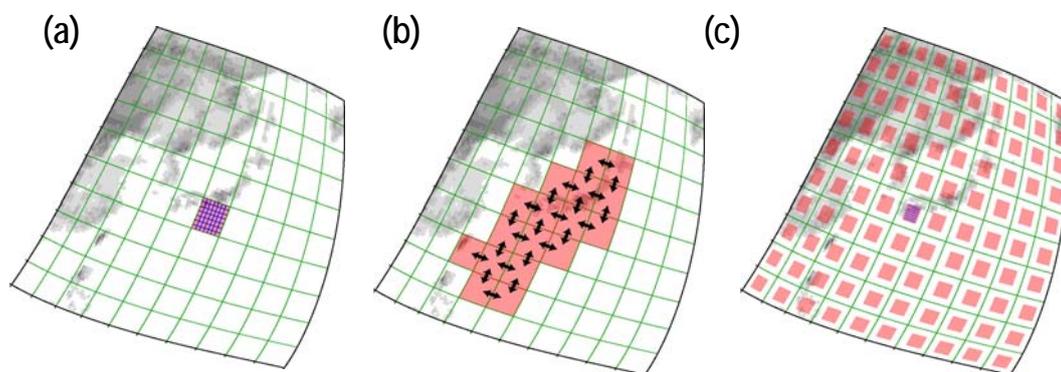


図2：FlexNestの概念図。細いメッシュはGCMの格子(100~200km)を、陰影領域はそこに埋め込まれたCRM(格子1~5km)を表す。FlexNestでは、(a) CRMの領域単位をGCMの1格子で定義することで、(b) 複数のCRMを用いて自由な領域でのネスティング、あるいは(c) スーパーパラメタリゼーションどちらにも適用可能である。

本サブテーマの開発するFlexNestには、従来のモデルと比較して次のような新奇性がある。

- ・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、継ぎ当り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。

<sup>3</sup> 本研究課題の申請時に用いたsuper GCMという語は、このFlexNestを全球に拡張した場合のものである。計算資源および研究期間の制約上、FlexNestを本当の意味でのsuper GCMとして用いることは難しいが、本研究課題でモデルの開発が成功すれば、あとは計算機と時間だけの問題である。

- ・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）。

FlexNest自体は気候研究一般に用いることができるが、温暖化研究への応用を考えて日本周辺域のメソスケール気象現象に着目し、CRMを適用する領域として図2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。

FlexNestは米国のグループが作成しているものとは異なる発想によるものであり、地球環境、特に気候研究における新たなモデリング手法を提示することを目指す。FlexNestではCRM領域の設定が自由自在であり、後で示すようにネスティングでしばしば問題になる、境界における地形に起因する不安定を避けることができる。FlexNestは野心的なモデル開発の試みであるが、前例がないだけに開発には相当の時間がかかると予想される。そこで、本サブテーマでは、中核たるモデル開発に絞って研究を行う。

### 3. 研究方法

2. で述べたとおり、本研究は新たなモデルの開発とその応用という2つの側面をもつが、本サブテーマは、そのうちモデルの開発を担う。FlexNestを構成するGCMおよびCRMには、それぞれ東京大学・国立環境研究所・海洋開発研究機構で開発されたCCSR/NIES/FRCGC AGCMと、名古屋大学地球水循環研究センターで開発されたCReSSを用いる。各々のモデル自体は過去に多くの実績をもち、単独で動かすことにはなにも支障がない。しかし、両者をインタラクティブに組み合わせることでFlexNestを構築することには多くの技術的・概念的問題を伴う。

平成18年度においては、基本的なFlexNestの物理的デザイン、高速計算のためのコード設計を初期にサブグループ(2)～(4)を交えて議論し、以下のような2段階でモデル開発を行うこととした。

#### (1) 第1段階

CReSSを全球気候モデルに合わせて球面座標系へ変更した。また、FlexNestでは、GCMの1格子が新たな領域（内部領域と呼ぶ）の単位となるが、その際、領域内部に関して従来通り行うCReSSの並列処理とは別に、複数領域（外部領域と呼ぶ）での並列処理が必要となる。これには、多重並列と呼べる方法を考案して対応した。これにより、GCMの任意の格子へ、その領域を覆うCRMをいくつでも組み込むことができるようになった。

この段階のFlexNestとしては、短期のシミュレーションが可能になるよう、GCMから初期値、海面水温などの境界条件、およびCRMの場では表せない大規模な移流などの強制項をCRMへ各ステップで渡して、1方向で結合した。米国で行われているMMFと同様に、まずはCRMの各内部領域間につながりのない(すなわち各内部領域は周期境界であると仮定する)システムを構築した。

## (2) 第2段階

第1段階でシステムの基本的な部分は既に構築されているので、これを2方向に拡張し、さらにGCMからCRMへ渡される場を水平方向に平滑化することで内部領域間のやりとりを可能にする。この時点で、FlexNestを日本周辺域に設定して本来のシミュレーションを行うことが可能である。また、詳細な地形をCRMへ与えて地形効果も適切に表現する。最後に、各内部領域を圧縮することで図1cのようなスーパーパラメタリゼーションを実装する。

## 4. 結果・考察

平成18年度終了時点では、第1段階の開発を終え、基本的なモデル動作特性のテストとして複数の異なる領域へCRMをあてはめたシミュレーションを行った。CRMを組み込んだ外部領域が不規則な形状をしていても何も問題はないことが確認された。従来のネスティングと呼ばれる手法でスケールギャップのある2つのモデルを組み合わせると計算的に問題が出てくる可能性は、サブテーマ(4)の報告で判明しているが、これは境界でCRMを制約していること、矩形領域の端に地形があることによる大気擾乱の人為的な成長である場合が多い。FlexNestでは、そもそもGCMとCRMの結合方法が従来のネスティングとは異なり、スケールを分離して内部領域に対してもGCMからの強制を与えるので<sup>4</sup>、この問題は原理的に回避できる。

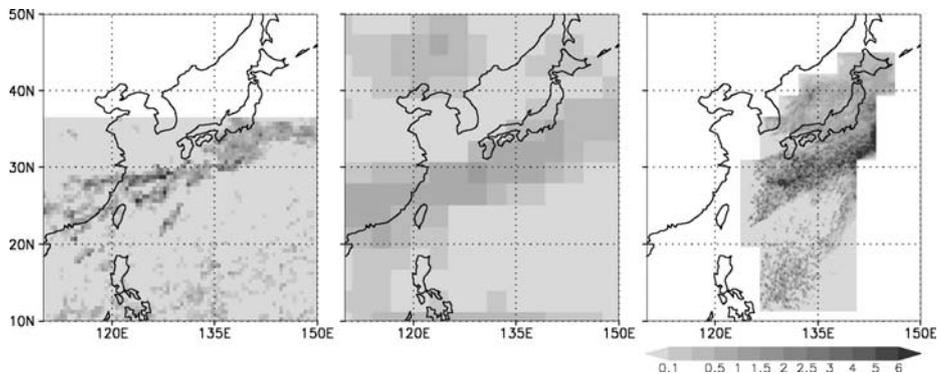


図3：(左)人工衛星による2005年6月の降水量、FlexNestの1方向ダウンスケーリングで行った同時期の(中)GCMおよび(右)CRMにおける降水量の分布(単位ミリ/時)。CRMでは、GCMで表現できない梅雨前線での強い降水がシミュレートされている。

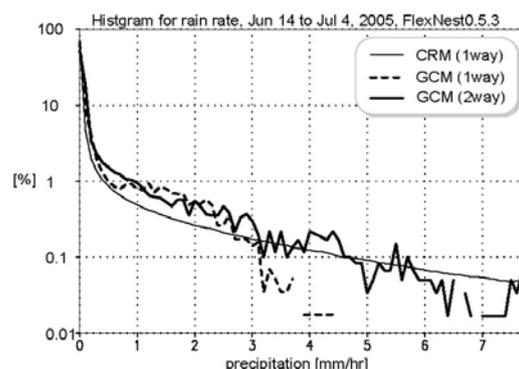
平成19年度はさらに実用段階へ向けて、2方向計算の実装、細かい地形を与えたときの計算、スーパーパラメタリゼーションの実装などを行った。年度後半では、検証実験として2002年以降の梅雨期(6月から7月前半)のシミュレーションを、格子250km相当のAGCMと格子5kmのCRMを組み合わせで実行した。日本周辺領域をカバーするため、64のCRMを図2bのように連結して解く。図3はその結果で、2005年の梅雨期で平均した降雨量について(左)人工衛星TRMMのデータと(中)AGCM、および(右)CRMの計算を比較している。AGCMではわずかに梅雨前線ら

<sup>4</sup> 気象庁・気象研究所で開発されたスペクトル境界法が概念として近い。

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4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。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。

図4: 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。



## 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。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見通しである。

## 6. 引用文献

- (1) Randall, D. A., M. Khairoutdinov, A. Arakawa, and W. Grabowski, 2003: Breaking the cloud parameterization deadlock. *Bull. Ame. Meteor. Soc.*, **84**, 1547-1764.

## 7. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

## 8. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

〈論文（査読あり）〉

なし

〈その他誌上発表（査読なし）〉

なし

### (2) 口頭発表（学会）

- 1) 渡部雅浩, 江守正多, 2007: CCSR/NIES/FRCGC AGCMにおけるPDF予報型雲スキームの開発. 日本気象学会2007年度秋季大会予稿集A215.
- 2) 吉岡真由美, 坪木和久, 渡部雅浩, 榊原篤志, 2008: 雲解像モデル CReSS による局所領域タイル状高解像度シミュレーション. 日本地球惑星科学連合 2008 年大会 J161.
- 3) 渡部雅浩, 榊原篤志, 長谷川晃一, 坪木和久, 2008: MIROCとCReSSを用いたマルチスケールモデリング. 日本気象学会2008年度春季大会予稿集A205.

### (3) 出願特許

なし

### (4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

なし

### (5) マスコミ等への公表・報道等

なし

### (6) その他

なし