

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 22 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22740310

研究課題名(和文) 全球雲解像気候計算実現に向けた数値計算法の高度化

研究課題名(英文) Improvements of numerical schemes for the global cloud-resolving climate simulations in near future

研究代表者

三浦 裕亮 (Miura, Hiroaki)

東京大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70415991

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円、(間接経費) 960,000円

研究成果の概要(和文)：雲の統計的簡略化を行わず雲微物理過程を直接計算する全球雲解像モデルは、最先端のスーパーコンピュータ(京や地球シミュレータ)を利用して実用化が進められており、気候計算の精度を著しく向上させると期待されている。しかし、全球雲解像大気モデルは未だ完成されたものではなく、モデルの基礎となる流体方程式の離散化の部分でも、計算安定性や計算精度の点で課題が残っている。本研究では、水平方向について高精度な輸送スキームと高次精度の傾き項の離散化法を開発し、鉛直方向についてはパーシャルセル法に基づく離散化手法のテストを行った。本研究で開発した新手法を用いることで、全球雲解像モデルの信頼性が高まると期待できる。

研究成果の概要(英文)：A state-of-the-art global cloud-resolving model (CRM) that computes cloud microphysical processes directly without using cumulus parameterizations is being developed in Japan by using cutting-edge supercomputers such as "K" and the Earth Simulator. It is widely thought that global CRMs will enable climate simulations of higher reliability if they can be run on much faster computers in near future. Currently, however, there remain problems in a global CRM even in the component called "dynamics", which consists of a discretized set of the equations of fluid, in terms of the stability and the accuracy. In this work, new transport schemes and a new discretization method of the gradient operator were developed in the horizontal direction and a partial cell method was tested for the vertical direction. Those schemes developed in this work will enhance a credibility of a global CRM.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：気象・海洋物理・陸水学

キーワード：気候 気候モデル 気象モデル 雲解像モデル 数値スキーム

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 地球シミュレータを代表とするスーパーコンピュータを利用した気候モデルの計算結果は、地球温暖化を始めとした気候の将来予測の上で、重要な科学的根拠となっている。その一方で、気候モデルには雲やエアロゾルなど様々な不確定要因が残っており、不確実性の幅を狭めるべく、さまざまな努力がなされている。日本では、既存の気候モデルの改良と並行し、世界に先駆けて全球雲解像モデルが実用化された。全球雲解像モデルは既存の大気モデルとは比較にならないほど詳細に雲の構造を計算できることから、将来的に全球雲解像モデルを気候計算に利用することで、気候予測の不確実性を大きく減じることができると期待されている。

(2) しかしながら、全球雲解像モデルを用いた気候計算を実用するには課題も多い。計算結果が格子内の現象を表現するパラメタリゼーションのスキームに大きく依存するという気象学的な問題にとどまらず、地形を含む現実的な高解像度実験において計算が不安定化するという数値計算的な問題も発生している。気候の研究においては、モデルの計算が安定に遂行できること、また、温度や風などの物理量の現実的な平均場が計算できることが大前提となるが、全球雲解像モデルではそれらの要件を満たしておらず、さらなる改良が必要とされている。

### 2. 研究の目的

(1) 上記の現実的気候場の再現性の問題と計算不安定化の問題のうち、前者の研究は最先端のスーパーコンピュータを利用した膨大な計算を必要とするため、本研究の枠組みでは実施が不可能であった。そこで、限られた計算資源においても十分に可能な、数値計算法の改良を通じた長期間の安定計算の実現と計算精度の向上を研究目的とした。

### 3. 研究の方法

(1) 全球雲解像モデルで用いられている水平方向の A-grid 変数配置と地形に沿った鉛直方向の z\*座標系の組み合わせが局所的な誤差の蓄積を許し、計算の不安定化を引き起こすと考えられることから、A-grid 変数配置を ZM-grid 変数配置に変更するべく、ZM-grid 変数配置の実用化に取り組んだ。

(2) 全球雲解像モデルでは正 20 面体格子と呼ばれる特殊な形状の格子を採用しているために、直感的に定式化できる 2 次精度の輸送スキームが用いられていた。しかし、気象現象のより良い再現のためには、温度や水蒸気に高精度の輸送スキームを採用することが必要であった。そこで、3 次精度輸送スキームの開発に取り組んだ。

(3) 水平解像度が非常に高くなると急峻な

地形が表現されるようになり、既存の z\*座標系を鉛直離散化に用いたモデルでは地形周辺で計算誤差が大きくなる問題が指摘されている。そこで、パーシャルセル法を用いた鉛直離散化法のテストを行った。

### 4. 研究成果

(1) 正 20 面体格子上に ZM-grid 法を用いた浅水モデルを構築した。ZM-grid 法では高度を 6 角形中心に、速度を 6 角形頂点に定義する。球面上の浅水モデルに関する標準的なテストを行い、新しく開発したモデルが従来モデルよりも高精度であることを確認した。特に、傾き項の離散化手法を見直し、歪んだ格子でも 2 次精度を保つように工夫した。その結果、ZM-grid の計算モードの増幅を大幅に低減することができた。さらに、これまで特定されていなかった ZM-grid の計算モードの空間構造を特定し、計算モードを抑える手法を考案した。この成果により、ZM-grid を用いた長期積分が可能になる。

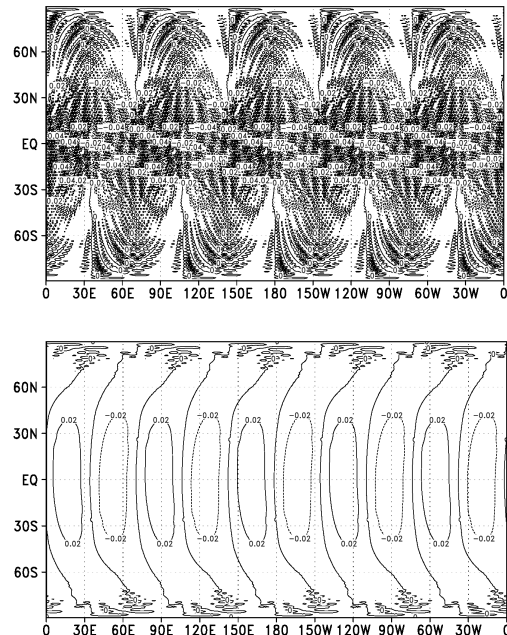


図 1. 浅水モデルを用いた Williamson et al. (1992) のテスト 2 の条件で 10 日積分したときの南北風のエラー。既存の 1 次精度傾き項を用いた場合(上)と比べ、2 次精度傾き項を用いた場合(下)にはエラーが大幅に軽減されている。

(2) 正 20 面体格子に高精度・高解像度の輸送スキームである Piecewise Parabolic Method (PPM 法) を拡張する新手法を開発した。標準的な輸送スキームの検証テストを実施し、既存のスキームに比べ格段に精度のよい計算が実行できることを確かめた。この成果を論文化する際に、米国 National Center for Atmospheric Research で正 20 面体格子を用いた大気モデル開発を統括している Skamarock 博士から解法を高速化する新規ア

ルゴリズムの提案を受け、共同研究に発展した。

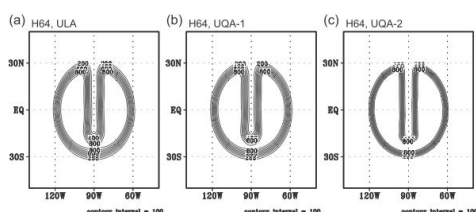


図2: 切り口の入った円柱を輸送するテスト結果。既存手法(a,b)に比べ新手法(c)では円柱の境界がシャープに捉えられている。

(3) PPM法を拡張した高精度スキームは力学的な波動と結合していないパッシブトレーサーの輸送を想定して開発したのに対し、温度などの力学のシステム方程式系を構成する物理量の輸送に用いるべく、別の高精度スキームを開発した。開発したスキームは、気象モデルで広く採用されている3次精度手法を、2次関数を利用した格子内の変数分布の再構築に一般化することで、6角形格子へ拡張したものである。標準的な検証テストを実施し、正20面体上において3次精度とすることを確かめた。

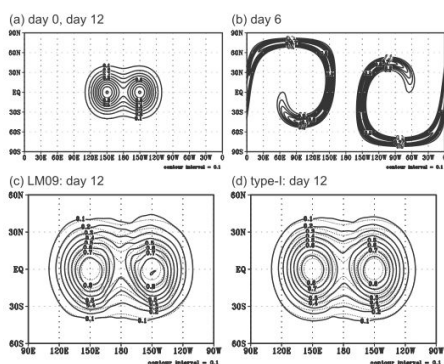


図3: ガウス型の山を用いた輸送テストの初期条件(a)と6日積分後の結果(b)。12日積分後の結果を比較すると、既存手法(c)にくらべ新手法(d)では歪みが少なく真値に近い結果を得た。

(4) 鉛直方向の地形の表現に $z^*$ 座標系ではなくパーシャルセル法を用いた鉛直離散化を行った。既存文献の調査では鉛直方向の音波に陰解法を用いる手法を見つけることができなかつたため、新規に定式化を行った。標準的なテストにおいて、滑らかな斜面の場合と比較的急峻な斜面の場合に、 $z^*$ 座標系のモデルに比べ遜色ない結果を得ることができた。 $z^*$ 座標系を原理的に用いることのできない切り立った斜面を計算する場合など、将来的なモデルの高解像度化に伴い、有用とすることが期待できる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 3件)

Miura, H., 2013: An upwind-biased conservative transport scheme for multi-stage temporal integrations on spherical icosahedral grids. *Monthly Weather Review*, 141, 4049-4068. doi:10.1175/MWR-D-13-00083.1 (査読有)

Miura, H., and W. C. Skamarock, 2013: An upwind-biased transport scheme using a quadratic reconstruction on spherical icosahedral grids. *Monthly Weather Review*, 141, 832-847. doi: 10.1175/MWR-D-11-00355.1 (査読有)

Miura, H., T. Maeda, and M. Kimoto, 2012: A comparison of the Madden-Julian Oscillation simulated by different versions of the MIROC climate model. *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, 8, 165-169. doi:10.2151/sola.2012-040 (査読有)

〔学会発表〕(計 7件)

三浦裕亮: 全球雲解像気候計算に向けて、2013年度気象学会春季大会、2013年5月18日、代々木オリンピックセンター(東京都)。

Miura, H., and M. Satoh: Recent activities of the NICAM group and our science targets on K-computer, CMMAP 13<sup>th</sup> Team Meeting, 2012年8月8日、Fort Collins, Colorado, USA.

Miura, H., and R. Yoshida: A global cloud-resolving model, The 2012 Dynamical Core Model Intercomparison Project, 2012年8月6日、Boulder, Colorado, USA.

三浦裕亮: 気象・気候分野における数値モデリングの現状と将来展望, RIMS研究集会「科学技術計算における理論と応用の新展開」, 2011年10月27日、京都大学数理解析研究所(京都府)。

三浦裕亮: 数値気候モデル研究の現状と将来展望, 「地球環境流体研究と数理科学」ワークショップ, 2011年6月9日、北海道大学理学研究院3号館(北海道)。

Miura, H.: Cloud-resolving modeling and its potential for climate study, Korea-Japan Joint Workshop on Climate System Modeling, 2010年9月27日、Ansan, Korea.

Miura, H.: Application of the spherical geodesic grid to a climate model, Workshop on High-Resolution Global Modeling, 2010年6月15日、Fort Collins, USA.

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

東京海上日動社内セミナー「気候変動と自然  
災害リスク～企業のお客様への最適な自然  
災害リスク関連ソリューションの提供に向  
けて～」，2011年1月14日，東京海上日動  
ビルディング（東京都）

6．研究組織

(1)研究代表者

三浦 裕亮（MIURA, Hiroaki）  
東京大学・大学院理学系研究科・准教授  
研究者番号：70415991

(2)研究分担者

（ ）

研究者番号：

(3)連携研究者

（ ）

研究者番号：