

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2019

課題番号：16K13881

研究課題名（和文）直交格子積み上げ法によって格子形成した雲解像モデルの開発

研究課題名（英文）Development of a cloud-resolving model based on the building cube method

研究代表者

重 尚一（Shige, Shoichi）

京都大学・理学研究科・准教授

研究者番号：60344264

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、熱帯降水システムの再現に必要な十分な計算効率の高い雲解像モデルを直交格子積み上げ法に基づいて開発した。直交格子積み上げ法では計算領域を異なる解像度を持つことのできる複数のキューブ状に分割して表現する。本研究では渦スケールの小さい下層を解像度の高い格子、渦スケールが比較的大きい上層を粗い格子でそれぞれ表現することで、格子点数を減らし効率的に対流の発達を表現する。暖気塊実験及び2次元スクロールライン実験から、直交格子積み上げ法を用いた格子点数の削減により計算コストを減らし、下層の解像度を局所的に高めることで対流の発達を効率的に再現できることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した直交格子積み上げ法を採用した雲解像モデルは水平解像度を鉛直方向に一定・不変とする従来の大気モデルとは大きく異なり、雲の発達の再現に重要な下層の解像度を局所的に高めることを可能にする。特に3次元実験では2次元実験に比べて計算コストが大幅に増加するため、本研究で開発した雲解像モデルを3次元化することで計算コストの改善はより効果的となると考えられる。計算コストを抑えつつ下層の解像度を高めた実験が可能となるためより広い領域を対象とした実験を可能にし、次世代の全球雲解像モデル開発の起点となり、雲解像モデルを用いた様々な降水システムの特性的説明や予報に寄与する。

研究成果の概要（英文）： We developed a cloud-resolving model to simulate tropical precipitation systems efficiently based on the building cube method, which divided the computational region into cubes that can have different resolution. In our cloud-resolving model, the high resolution cube represents the lower layer where the eddy scale is small, and the low resolution cube represents the higher layer where the eddy scale is large. This representation based on the building cube method leads to decreasing the number of cells and simulating the development of convection efficiently. A warm bubble test and a 2D squall line test showed that our cloud-resolving model succeeded in decreasing the computational cost by decreasing the number of cells with the building cube method, and can simulate development of convection efficiently by locally increasing the resolution in the lower layer.

研究分野：大気物理学

キーワード：雲解像モデル 直交格子積み上げ法

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

雲解像モデル(cloud resolving model)は、水滴や氷粒子の成長過程(雲微物理過程)を組み込んだ大気数値モデルであり、雲の発達再現に用いられる。しかし、解像度が不十分な際に再現される雲が過剰に鉛直方向に発達してしまう事が、報告者の研究 (Shige et al. 2009)他で数多く報告されている。この意味から、雲許容モデル(cloud permitting model)と控えめに呼ぶべきという意見もある(二宮 2004)。雲の過剰な発達の抑制には、乱流渦を直接表現する水平解像度 100m の必要性が指摘されている(Petch et al. 2002 他)。既存のモデルは水平解像度が鉛直方向に一定・不変であるため、水平解像度 100m では計算コストが膨大となり、広い領域での計算が難しい。研究開発当初、全球雲解像モデルの水平解像度は最高でも 870m である(Miyamoto et al. 2014, 2015)。乱流渦は上空ほど大きくなると考えられ、乱流渦を解像するための高解像度化は鉛直全層で必要とは限らない。Yamazaki et al. (2016, 以下 Y16) は、計算領域を異なる解像度を持つ複数のキューブ状に分割して表現する「直角格子積み上げ法」(Nakahashi 2003)を導入することで、水平解像度が鉛直方向に変化する新しい格子構造の 3 次元非静力学乾燥大気モデルを開発した。このモデルに雲微物理過程を導入した雲解像モデル(図 1)を開発できれば、大幅な計算コスト短縮の下、雲の発達特性の再現に必要な乱流渦の直接表現が可能になると考え、本研究を行った。

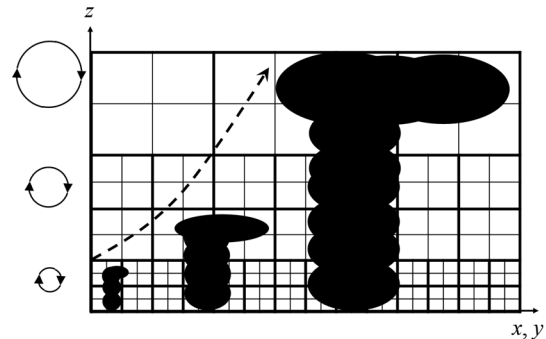


図 1 本研究で開発する雲解像モデルの概念図。水平解像度が地面付近で高く、上空ほど粗い格子構造で、スケールが鉛直方向に変化する乱流渦を効率的に直接表現する。

2. 研究の目的

本研究は、直角格子積み上げ法を導入した 3 次元雲解像モデルを開発し、熱帯対流の雲の発達特性を再現するために必要十分かつ飛躍的に高い計算効率を持つ格子構造を導き、その先進性・有用性を示す事を目的とする。直角格子積み上げ法により水平解像度が地面付近で高く、上空ほど粗い格子構造を用いることで雲解像モデルの計算コストが削減され、従来の雲解像モデルに比べて同等の計算コストで広い領域を用いた実験が可能となる。直角格子積み上げ法を適用する際に、高い解像度で表現する範囲は計算コスト及び雲の発達の再現性に影響を与える。本研究で対象としている熱帯対流の雲の発達を再現するために適切な格子構造を検証する。

3. 研究の方法

Y16 により開発された 3 次元非静力学乾燥大気モデルに雲微物理過程を実装することで、直角格子積み上げ法を採用した 3 次元雲解像モデルを開発する。計算コストの検証として計算領域を直角格子積み上げ法を適用しない 1 層、直角格子積み上げ法を適用し 2 層化及び 3 層化でそれぞれ表現して暖気塊の再現実験を行い開発した雲解像モデルの計算コストを検証する。同様に直角格子積み上げ法を適用しない 1 層で再現した対流を基準値として、水平解像度を変化させて格子構造が雲の発達の再現性に与える影響を検証する。

4. 研究成果

研究開始当初は Y16 により開発された 3 次元非静力学乾燥大気モデルに雲微物理過程を実装する予定であったが、難しいことが判明した。Y16 の 3 次元非静力学乾燥大気モデルでは熱力学の式を解く予報変数として気圧を用いていたが、水の相変化に伴う非断熱加熱項を考慮すると、状態方程式に基づく変換が煩雑となる。特に、時間ステップ計算後に温位に基づいた過飽和度もしくは不飽和度に応じて水蒸気と雲粒の変換を行う湿潤飽和調節法の適用が難しくなる問題が生じた。そのため、本研究では予報変数に温位を用いた支配方程式系へと変更する必要が生じた。支配方程式系は数値モデルの根幹の部分であるため、Y16 の 3 次元非静力学乾燥大気モデルを変更するのではなく、新しい雲解像モデルを一から開発を行うという方針に変更した。

新しい雲解像モデルの開発コストを削減するために 2 次元へと簡略化し、雲微物理過程は実装の簡便さから暖かい雨を表現する Kessler スキーム (Kessler 1969) を実装した。雲解像モデルでは雲粒及び雨滴等の水物質の密度のような物理的に非負の値である予報変数を取り扱う。非負の変数を計算する際には数値振動の存在により負の値となることを回避するために、非負の値を維持する正定値性を満たす移流スキーム等が必要となる。本研究では時間積分法に 3 次精度 TVD ルンゲクッタ法、移流スキームに 4 次精度中心差分法と 1 次精度風上差分法を組み合わせたフラックス修正法 (Zalesak 1979) を採用した。さらに直角格子積み上げ法では、格子の解像度が変わる境界において上記のスキームに加え、境界面でのフラックスを修正し正定値性を維持するスキームが必要となる。本研究では、研究協力者の武村が複数の格子を重ね合わせて領域を表現する重合格子法用に開発したフラックスフィルターを応用した新たなフラックスフィルターを考案し適用した。

開発した雲解像モデルの計算コストの検証として暖気塊の数値実験を行った。暖気塊実験では水平方向に 40km、鉛直方向に 30km の計算領域を用いて、初期擾乱として配置した振幅 2K の幅 3km の暖気塊により生じる対流を再現する。地表付近の下層を対象とした第 1 層は解像度 125m として、中層を対象とした第 2 層は解像度 250m、上層を対象とした第 3 層は解像度 500m とした。直交格子積み上げ法を適用しない 1 層のみの場合 (Lay1) と、直交格子積み上げ法を適用し第 1 層と第 2 層を用いた 2 層化した場合 (Lay12)、第 1 層から第 3 層まで用いた 3 層化した場合 (Lay123) のそれぞれで表 1 の格子設定を用いて実験し計算コストの比較を行った。図 2 は実験の結果であり、Lay1 をスレッド数 1 で実行した際の速度を 1 とした場合の速度比を示している。計算を行う必要がある格子点数が Lay1 に比べて Lay12 及び Lay123 では大幅に減少しているため、速度が増加している。全ての表現でスレッド数が増加するにつれて理想の速度比との差が開いているが、並列化できない部分や並列化に伴うオーバーヘッドが原因である。スレッド数に対する速度比の変化の傾向はどの表現でも同様であることから直交格子積み上げ法による並列化への影響は十分に小さいと言える。

開発した雲解像モデルの再現性の検証として 2 次元スコールラインの数値実験を行った。実験設定は米国国立大気研究センターを中心に開発が進められているメソ気象モデル WRF (Weather Research and Forecast) のテストケースである 2 次元スコールラインの設定 (Skamarock et al. 2008) を用いた。計算領域は水平方向に 40km、鉛直方向に 20km であり初期条件として高度 1.5km に振幅 3K の暖気塊を配置する。第 1 層の解像度を 125m、第 2 層の解像度を 250m として、計算領域全体を第 1 層のみで表現した場合 (Lay1)、高度 4km までを第 1 層で表現し残りを第 2 層で表現した場合 (Lay12)、計算領域全体を第 2 層で表現した場合 (Lay2) の 3 つを比較した。図 3 は 30 分後の雲粒の混合比の分布を示している。Lay1 では全域の解像度が高いため細かい渦が表現されているが、Lay2 では解像度が粗く平滑化されており極値も Lay1 に比べて小さい。Lay12 では上層の解像度が粗いため構造が平滑化されているが、Lay2 に比べると全体的な分布や極値が Lay1 に近くなっている。これは Lay12 では下層の解像度が Lay1 と同じであり Lay2 より高く、対流の発達をより再現できているためだと考えられる。以上の結果から本研究で開発した雲解像モデルは直行格子積み上げ法を用いることで下層の解像度を高め対流の発達の効率的な再現に成功したと言える。

表 1 暖気塊実験の格子設定。

	第 1 層 解像度 125m	第 2 層 解像度 250m	第 3 層 解像度 500m	合計格子点数
Lay1	320 × 240 (0~30km)	なし	なし	76800
Lay12	320 × 32 (0~4km)	160 × 104 (4~30km)	なし	26800
Lay123	320 × 32 (0~4km)	160 × 32 (4~12km)	80 × 36 (12~30km)	18240

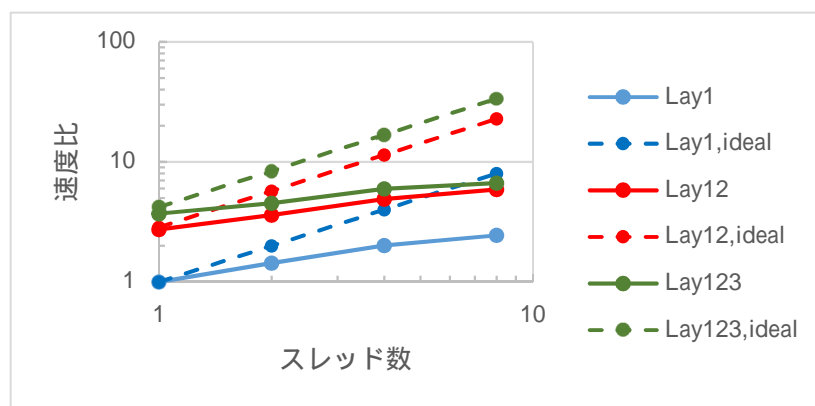


図 2 暖気塊実験の Lay1 をスレッド数 1 で実行した際の速度を 1 とした場合の速度比とスレッド数。青色、赤色、緑色がそれぞれ Lay1、Lay12、Lay123 を示し、実線は計測結果、破線は理想値を示す。

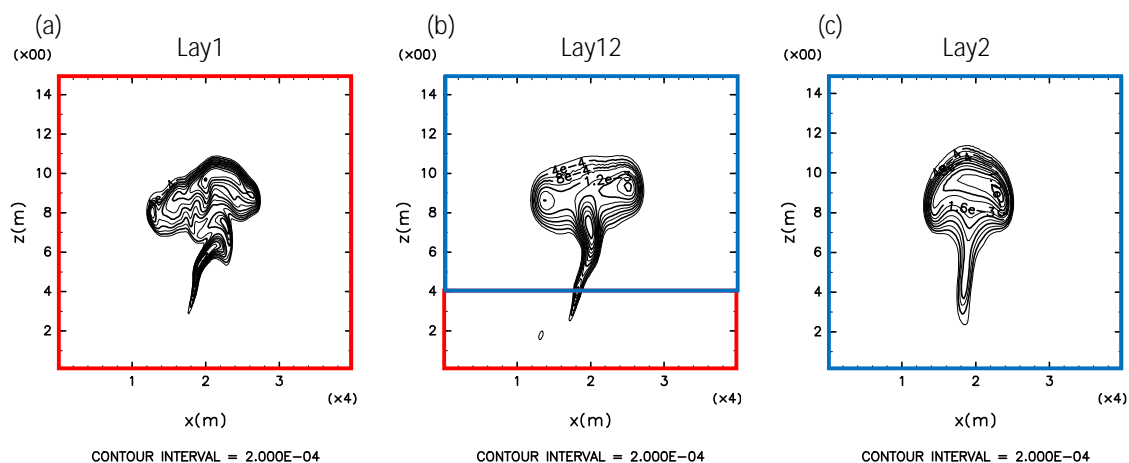


図3 暖気塊実験による 30 分後の雲粒の混合比[kg/kg]の分布。等値線間隔は 2×10^{-4} [kg/kg]。(a) Lay1 (b) Lay12 (c) Lay2。赤線は第 1 層で表現される領域、青線は第 2 層で表現される領域を示している。

本研究では雲の発達特性を効率的に再現するために直交格子積み上げ法を採用した雲解像モデルを開発した。水平解像度を鉛直方向に一定・不変とする従来の大気モデルとは大きく異なり、雲の発達の再現に重要な下層の解像度を局所的に高めることが可能となり、計算コストを抑えつつ下層の解像度を高めた実験が可能となる。特に 3 次元実験では 2 次元実験に比べて計算コストが大幅に増加するため、本研究で開発した雲解像モデルを 3 次元化することで計算コストの改善はより効果的となる。局所的に解像度を高めることでより広い領域を対象とした実験が可能となり、次世代の雲解像モデル開発の起点となり、雲解像モデルを用いた様々な降水システムの特性解明や予報に寄与する。また、階層構造を利用して数値実験を行うことで各高度の雲の発達に影響を与える乱流渦の水平スケールを解明することができ、現象の解明に寄与する。

<引用文献>

- Kessler, E., 1969: *On the Distribution and Continuity of Water Substance in Atmospheric Circulation, Meteorol. Monogr. No. 32, Amer. Meteor. Soc.*, 84pp.
- Miyamoto, Y., M. Satoh, H. Tomita, K. Oouchi, Y. Yamada, C. Kodama, and J. Kinter, 2014: Gradient Wind Balance in Tropical Cyclones in High-Resolution Global Experiments. *Mon. Wea. Rev.*, **142**, 1908-1926.
- Miyamoto, Y., R. Yoshida, T. Yamaura, H. Yashiro, H. Tomita, and Y. Kajikawa, 2015: Does convection vary in different cloud disturbances? *Atmos. Sci. Lett.*, **16**, 305-309.
- Nakahashi, K., 2003. Building-cube method for flow problems with broadband characteristic length In *Computational Fluid Dynamics 2002*, Armfield, S., Morgan, R., Srinivas K. (eds.): 77-81. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg/Germany.
- Petch, J.C., A. R. Brown, and M. E. B. Gray, 2002: The impact of horizontal resolution on the simulations of convective development over land. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, **128**, 2031-2044.
- Shige, S., Y. N. Takayabu, S. Kida, W.-K. Tao, X. Zeng, C. Yokoyama, and T. L'Ecuyer, 2009: Spectral retrieval of latent heating profiles from TRMM PR data. Part IV: Comparisons of lookup tables from two- and three-dimensional cloud-resolving model simulations. *J. Climate*, **22**, 5577-5594.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. Gill, D. Barker, M. Duda, X. Y. Huang, W. Wang, and J. G. Powers, 2008: A description of the advanced research WRF Version 3. NCAR Technical Note NCAR/TN- 475+STR, Boulder, Colorado.
- Yamazaki, H., T. Satomura, and N. Nikiforakis. 2016: Three-dimensional cut-cell modelling for high-resolution atmospheric simulations. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **142**, 1335-1350.
- Zalesak, S. T., 1979: Fully multidimensional flux-corrected transport algorithms for fluids. *J. Comput. Phys.*, **31**(3), 335-362.
- 二宮 洸三, 2004: 数値予報の基礎知識, オーム社, 230 pp.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 武村一史・重 尚一
2. 発表標題 重合格子法における単調性及び保存性を持つ補間法の開発
3. 学会等名 日本気象学会2019年度春季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazushi Takemura
2. 発表標題 Development of a non-hydrostatic atmospheric model using the Chimera grid method for a steep terrain
3. 学会等名 Workshop on Moving and Adaptive Meshes for Global Atmospheric Modelling (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 武村一史・重 尚一
2. 発表標題 重合格子法を用いた非静力学モデルへの保存性補間法の実装
3. 学会等名 日本気象学会2017年度春季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 武村一史・重 尚一
2. 発表標題 重合格子法における補間法による保存性の検証
3. 学会等名 日本気象学会2016年春季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Kazushi Takemura, Keiichi Ishioka, Shoichi Shige
2. 発表標題 Development of a non-hydrostatic atmospheric model using the Chimera grid method for a steep terrain
3. 学会等名 Dynamical Core Model Intercomparison Project Workshop 2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 武村一史・重 尚一
2. 発表標題 重合格子法により地形表現を行う大気モデルへの保存性補間法の導入
3. 学会等名 日本流体力学学会2016
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Kazushi Takemura, Keiichi Ishioka, Shoichi Shige
2. 発表標題 Development of a non-hydrostatic atmospheric model using the Chimera grid method for a steep terrain
3. 学会等名 The 5th KU-NTU Atmospheric Science Students/Young Scientists Exchange Program in 2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Kazushi Takemura, Keiichi Ishioka, Shoichi Shige
2. 発表標題 Development of a non-hydrostatic atmospheric model using the Chimera grid method for a steep terrain
3. 学会等名 the 4th International Workshop on Nonhydrostatic Models (国際学会)
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	山崎 弘恵 (Yamazaki Hiroe)		
研究協力者	武村 一史 (Takemura Kazushi)		