

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 24 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25800266

研究課題名(和文)水物質の相変化と流れの相互作用を解く次世代気象モデルの構築

研究課題名(英文)Development of a next-generation meteorological model with explicitly solving effects of water contents

研究代表者

宮本 佳明 (Miyamoto, Yoshiaki)

国立研究開発法人理化学研究所・計算科学研究機構・基礎科学特別研究員

研究者番号：90612185

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、水滴と流れの相互作用を陽に解く数値モデル(“空気+水滴”DNSモデル)を構築し、それを基に次世代の気象モデルの根幹部分の定式化を試みるものである。課題期間内にDNSモデルを構築に成功し、大型計算機での計算に向けて並列化・高速化も施した。さらに複数のテスト計算結果と観測・理論と比較することで、構築したモデルが現実的に利用可能であることを示した。また、数値実験において必ず伴う問題、方程式の離散化が解く現象に与える影響を、定量的に評価する理論的手法を考案した。さらに、水の相変化の影響が大きい気象現象である深い湿潤対流が、格子幅や背景場によって構造が異なることを示した。

研究成果の概要(英文)：This study aims to develop a sophisticated fluid model (direct numerical simulation model) with explicitly solving the phase change process of water and conduct numerical experiments on a supercomputer using the model. The development has been completed within the period of grant and the code has been parallelized and tuned for massive computers. A set of numerical experiments was conducted and the results were compared with observational data and theory that have been shown by previous studies. It was found that the performance of model is reasonable. On the other hand, I proposed an analytical method to quantitatively examine the effect of discretization on solved flow. It was also shown that the deep convection that is largely affected by phase change is sensitive to model resolution and background field.

研究分野：気象学

キーワード：気象モデル 乱流 相変化

1. 研究開始当初の背景

気象場は、流体力学を基に、雲や放射過程という熱力学と組み合わせた方程式系で記述できるため、本質的には Navier-Stokes 方程式を近似を施さずに解く直接計算 (DNS: Direct Numerical Simulation) を行うことが望ましい。しかし、数 mm スケールまでを取扱うことは、計算負荷の面から非現実的である。そのため通常格子幅は数 mm よりも粗く設定し、格子未満の現象はパラメタライズして解かれる (この定式化がモデル開発の肝となる)。

大気運動 (風) は二つの周波数帯にピークを持ち、最初は一週間程度の時間スケールのピークを解くべくモデル化が行われた。その後のモデルの高度化/コンピュータ性能の向上に伴い、現在では地球全体を数 km の格子幅で覆い、雲物理過程を陽に解く計算が可能となっている (e.g., Miura et al. 2007)。そこで今後は空間スケール数 10 m ~ 数 100 m のピークをどう解像するかが重要な課題となってくる。

現在主流のモデルでも格子幅を後者のピークに相当する数 10 m に設定できるが、そもそもこの種のモデルは時空間的に平均化 (Reynolds 平均) した物理変数を解くもので、ピーク B のような細かな変動は解像できない。つまり既存モデルの限界が近づいている。そこで近年、このピークを解像する計算手法として LES (Large Eddy Simulation) が提案されている。LES は、各変数にフィルター操作を施すことでフィルタスケール (~ 格子幅) 以上の現象 (Resolved Scale: RS 成分) を解き、それ未満の現象 (Sub-Grid Scale: SGS 成分) は RS 成分でパラメタライズして解く計算手法である。近似を施さない DNS よりも格段に軽い計算負荷で高精度の結果が得られるため、主に工学分野で多用され発展してきた。気象学でも大気境界層などで精度の良い結果が出ると報告されつつあり LES が次世代気象モデルのスタンダードとなる可能性が非常に高い。

LES への移行は数十 m 以上の現象を全て陽に解くことに等しいため、予報精度の向上はもちろん、現象の理解促進へ多大な貢献が期待できる。そのため近年、気象現象を LES で解く試みが多くなされてきた (例えば, Stevens et al. 2005)。しかし、雲が存在する場での精度が著しく悪化してしまう (野田と中村 2010)。これは、既存の LES が雲現象による SGS のエネルギー変化を考慮していないためと考えられている。つまり LES を気象分野に応用するには、水物質の相変化の影響を新たに含める必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、**湿潤過程を含む支配方程式系を定式化し、水物質の相変化に伴うエネルギー変化過程を加味した、次世代の気象モデルのスタンダードになる moist LES モデルを構築することを目的とする。**構築したモデルを用いて、水物質の相変化の流れ場に対するフィードバック過程を解明する。

3. 研究の方法

上の目的を実現するため以下の流れで研究を進める。

混合流体 (空気 + 水) DNS モデルの構築・疑似観測値の作成

申請者の所属するグループで開発した LES モデルを基に、空気と液水の混合流体 DNS モデルを構築する (液体のみを取扱う)。様々なテスト計算を行い、室内実験や理論と比較して、その精度を確かめる。さらには大型コンピュータを用いて、現実的な範囲で大気の大気・熱力学場を変化させたパラメタスイープ実験を行うことで疑似観測値を作成する。

水物質の相変化の影響を考慮した moist LES モデルの構築

で行う DNS の結果を基に、水物質 (の相変化) を考慮することによる影響を明らかにし、moist LES モデルを完成する。

4. 研究成果

まず始めに、数値実験において必ず伴う問題、方程式の離散化が解く現象に与える影響 (通常、解像度依存性問題と言われる) を、定量的に評価する理論的手法を考案した (Miyamoto et al. 2015b)。具体的には、解く方程式を離散化した上で、線形安定性解析を行い、卓越するモード (成長率が最大となる波数) の空間解像度依存性を解析的に導出した。その結果、定性的に考えられる結果 “解像度が粗いほど細かな構造が卓越しなくなる、即ち、低解像度ほど卓越波数が小さくなる” が得られた。ここで、支配方程式中の空間の 1 階微分項の離散化精度が良いと (ここでは 2・4・6 次精度の中央差分で離散化)、解像度が低くなくても卓越する波数が減少しにくいことが分かった。さらに、式をまとめた上で離散化するのではなく、モデルで解くように各式をそれぞれ離散化して評価しなければならなかった。

また、水の相変化の影響が大きい気象現象である深い湿潤対流が、格子幅やその背景場によって構造が変化することを示し、現象を現実的に解くために必要な解像度を示した (Miyamoto et al. 2013, 2015a)。また、水の相変化に非常に感度が高いことで知られる下層雲についても、大規模数値実験を行うことで、層積雲と積雲の形態の違いについて研究を行った。(Sato et al. 2014, 2015a, b, c)。

本研究の根幹である、“空気 + 水滴” DNS モデルを構築した。空気部分は Navier-Stokes 方程式を差分法により離散化して、大規模並列計算に向けて、MPI・OpenMP のハイブリッド並列に対応させた。境界条件として通常気象計算とは異なり、上下方向も周期境界とした。乱流を作り出す外力を与えるため、RCF (Reduced Communication Forcing, Onishi et al. 2011) の手法を取り入れた。水滴部分は、Lagrange 的にその運動量・大きさの時間発展を解くもので、位置する背景の空気の流速に応じて移動するとした。

構築した水滴 DNS モデルを用いて、様々なテスト計算を行った。具体的には、

- ・ 一様流下での粒子の移動実験：与えた空気の流速によって加速し、一定速度で移動するかを確認した。
- ・ 重力による水滴の落下実験：終端速度を理論値と比較した。
- ・ 水滴の衝突・併合実験：異なる大きさを

持つ2つの水滴を落下・衝突させ、落下までの時間スケール及び落下前後の質量・運動量の保存を確認した。

- ・ (重力を切った)相変化による水滴の粒径変化実験: 過飽和・未飽和環境下に水滴を浮遊させて、粒径の時間変化を調べ、理論・実験の値と比較した。
 - ・ 多粒子実験: 大きさの異なる多くの粒子を一度に領域に置いて、シアー流を与えて時間積分をした。粒子の衝突・併合による粒子数の減少など想定される結果となることを確認した。
- 以上のテスト実験の結果から、本研究で構築した水滴の挙動を陽に解くDNSモデルが現時的に利用できることが確かめられた。

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10件)

1. Leinonen, J., M. D. Lebsock, S. Tanelli, K. Suzuki, H. Yashiro, and Y. Miyamoto, 2015: Performance assessment of a triple-frequency spaceborne cloud-precipitation radar concept using a global cloud-resolving model. *Atmos. Meas. Tech.*, 8, 3493-3517, doi:10.5194/amt-8-3493-2015 (査読有り) .
2. Sato, Y., S. Nishizawa, H. Yashiro, Y. Miyamoto, Y. Kajikawa, and H. Tomita, 2015: Impacts of cloud microphysics on trade wind cumulus: Which cloud microphysics processes contribute to the diversity in a large eddy simulation? *Progress in Earth and Planetary Science*, 2:23, 16 (査読有り) .
3. Nishizawa, S., H. Yashiro, Y. Sato, Y. Miyamoto, and H. Tomita, 2015: Influence of grid aspect ratio on planetary boundary layer turbulence in large-eddy simulations. *Geosci. Model Dev. Discuss.*, 8, 6021-6094, doi:10.5194/gmdd-8-6021-2015 (査読有り) .
4. Sato, Y., S. Nishizawa, H. Yashiro, Y. Miyamoto, and H. Tomita, 2015: Corrigendum: "Potential of retrieving shallow-cloud life cycle from future generation satellite observations through cloud evolution diagrams: A suggestion from a Large Eddy Simulation". *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, 11, 1, cl, doi:10.2151/sola.2015-015 (査読有り) .
5. Sato, Y., Y. Miyamoto, S. Nishizawa, H. Yashiro, Y. Kajikawa, R. Yoshida, T. Yamaura, and H. Tomita, 2015: Horizontal Distance of Each Cumulus and Cloud Broadening Distance Determine Cloud Cover. *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, 11, 75-79, doi:10.2151/sola.2015-019 (査読有り) .
6. Miyamoto, Y., J. Ito, S. Nishizawa, and H. Tomita, 2015: A linear thermal stability analysis of discretized fluid equations. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, 29, 155-169, doi:10.1007/s00162-015-0345-x (査読有り) .
7. Miyamoto, Y., R. Yoshida, T. Yamaura, H. Yashiro, H. Tomita and Y. Kajikawa, 2015: Does convection vary in different cloudy disturbances? *Atmospheric Science Letters*, 16, 305-309, doi: 10.1002/asl2.558 (査読有り) .
8. 佐藤 陽祐、西澤 誠也、八代 尚、宮本 佳明、山浦 剛、富田 浩文, 2014: 完全圧縮LESモデルの開発と層積雲の成長過程に関する計算-雲・エアロゾル科学への計算科学からの貢献, *低温科学*, 72, 265-284. (査読有り)
9. Sato, Y., S. Nishizawa, H. Yashiro, Y. Miyamoto, and H. Tomita, 2014: Potential of retrieving shallow-cloud life cycle from future generation satellite observations through cloud evolution diagrams: A suggestion from a Large Eddy Simulation. *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, 10, 10-14 (査読有り) .
10. Miyamoto, Y., Y. Kajikawa, R. Yoshida, T. Yamaura, H. Yashiro and H. Tomita, 2013: Deep moist atmospheric convection in a sub-kilometer global simulation. *Geophysical Research Letters*, 40, 4922-4926 (査読有り) .

[学会発表](計8件)

1. Miyamoto, Y., 2015: Convection on the globe in the sub-kilometer global simulation. department seminar of Atmospheric Sciences in National Taiwan University, 06 Oct, 2015, Taipei, Taiwan. (Invited)
2. Miyamoto, Y., T. Yamaura, R. Yoshida, H. Yashiro, H. Tomita, and Y. Kajikawa, 2015: Predictability of deep moist atmospheric convection in a sub-kilometer global simulation. *AOGS 12th Annual Meeting*, 02 Aug - 07 Aug, 2015, Singapore, Singapore.
3. Miyamoto, Y., Y. Kajikawa, R. Yoshida, T. Yamaura, H. Yashiro, and H. Tomita, 2014: Deep Moist Atmospheric Convection in a Sub-kilometer Global Simulation. *Joint Workshop of 6th International Workshop on Global Cloud Resolving Modeling and 3rd International Workshop on Nonhydrostatic Numerical Models*, 24 Sep - 26 Sep, 2014, RIKEN AICS, Kobe, Japan.
4. Miyamoto, Y., J. Ito, S. Nishizawa, and H. Tomita, 2014: A linear thermal stability analysis of discretized fluid equations. *Joint Workshop of 6th International Workshop on Global Cloud Resolving Modeling and 3rd International Workshop on Nonhydrostatic Numerical Models*, 24 Sep - 26 Sep, 2014, RIKEN AICS, Kobe, Japan.
5. Miyamoto, Y., Y. Kajikawa, R. Yoshida, T. Yamaura, H. Yashiro, and H. Tomita, 2014: Deep moist atmospheric convection in a sub-kilometer global simulation. *AOGS 11th Annual Meeting*, 28 Jul - 01 Aug, 2014, Royton Sapporo Hotel, Sapporo, Japan.
6. Yashiro, H., Y. Kajikawa, Y. Miyamoto, R. Yoshida, T. Yamaura, and H. Tomita, 2014: Diurnal Cycle of the precipitation in a sub-kilometer global simulation. *AOGS 11th Annual Meeting*, 28 Jul - 01 Aug, 2014, Royton Sapporo Hotel, Sapporo, Japan.
7. Sato, Y., S. Nishizawa, H. Yashiro, Y. Miyamoto, and H. Tomita, 2014: Potential of Retrieving Shallow-Cloud Life Cycle from Next Generation Satellite Observations through Cloud Evolution Diagrams: A Suggestion from a Large Eddy Simulation. *AOGS 11th Annual Meeting*, 28 Jul - 01 Aug, 2014, Royton Sapporo Hotel, Sapporo, Japan.
8. Miyamoto, Y., Y. Kajikawa, R. Yoshida, T. Yamaura, H. Yashiro and H. Tomita, 2014: Deep moist convection in a sub-kilometer global simulation. *International Workshop on*

Climate System Modeling, 11 March,
Honolulu, Hawaii, U.S.A.

〔図書〕(計 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〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮本 佳明 (MIYAMOTO, Yoshiaki)
理化学研究所・計算科学研究機構・基礎科学特別研究員
研究者番号：90612185

(2) 研究分担者 ()

研究者番号：

(3) 連携研究者 ()

研究者番号：