

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K14559

研究課題名（和文）雲微物理解像の雲全体計算に向けた先端の数値計算手法の開発

研究課題名（英文）Development of a novel numerical model for cloud microphysics resolving cloud simulations

研究代表者

松嶋 俊樹 (Matsushima, Toshiki)

神戸大学・理学研究科・特命助教

研究者番号：00803553

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：超水滴法を用いたメートルからサブメートルスケールの数値シミュレーションが可能な数値モデルを構築した。構築した数値モデルは、従来の雲微物理スキームであるビン法より高速かつバルク法に匹敵する計算性能をもつ。また雲と乱流の相互作用をコントロールするパラメータの精度を改善する、最適輸送理論を用いたサンプリング手法の導入や、超水滴数密度の空間一様性を改善する高精度移流スキームの開発を行った上で、スーパーコンピューター「富岳」上で高いレベルの計算最適化を行い、直接数値実験(DNS)とラージ・エディ・シミュレーション(LES)のスケールギャップをつなげる解像度領域の計算が可能なことを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題により、直接数値実験とラージ・エディ・シミュレーションのスケールギャップを繋ぐ数値モデルを開発できた。従来不可能であった精度の数値シミュレーションが可能となることで、今後、微細スケールから気象・気候スケールまでの広いダイナミックレンジにおける、雲と乱流の相互作用の理解に繋がることが期待される。

研究成果の概要（英文）：We developed a particle-based cloud model for meter- to submeter-scale-resolution simulations of warm clouds. The time-to-solution of the developed model is shorter than that with a bin method and even comparable to that with a bulk method. In addition to high-level optimizations on the supercomputer 'Fugaku', our model incorporates a novel sampling method using optimal transport to estimate a parameter that controls the interaction between microphysics and turbulence, and a more accurate particle advection scheme to improve the spatial uniformity of the super-droplet number density. Finally, we demonstrated that our model supports numerical experiments with 2 m resolution, which may fill the gap between direct numerical simulations and large-eddy simulations.

研究分野：気象学

キーワード：雲微物理 乱流 ラージ・エディ・シミュレーション 超水滴法

### 1. 研究開始当初の背景

雲は、微細スケールから気象・気候スケールまでの広い時空間スケールにおいて、大気乱流と相互作用する。例えば、大気乱流の主要スケールである 100 m スケールでは、雲の中に大気を取り込むエントレインメントが起き、雲内の混合を駆動することで、雲内の温度・湿度などが変動する。その変動の中を、雲粒が小さな渦にのり、異なる場を行き来することで、水滴の大きさのスケール (~10 μm) よりもずっと大きな空間スケール (>1 m) で、雲の集団的な特性である粒径分布が特徴的な形状となる。雲の集団的な特性は、降雨のタイミングや光学的特性の変化につながり、結果として雲は気象・気候スケールへ影響を与える。

しかしながら、気象・気候の数値予測では、雲粒の集団的特性のみを解くバルク法を用いることが一般的であり、そこでは粒径分布に経験的な仮定を置くため、微細スケールの影響を考慮することができない。そのため、予測結果は大きな不確実性を含んでいる。より信頼できる予測を目指し、不確実性を低減するためには、より原理的な手法を用いて、微細スケールと大きなスケールの相互作用の過程の理解と数値モデリングを行うことが重要である。

このような背景をもとに、直接数値実験(DNS)に基づいた、雲の粒径分布の生成に関する詳細な解析や、ラージ・エディ・シミュレーション(LES)と超水滴法(SDM)により、雲粒の集団特性の特徴量である雲内の粒径分布の幅と、乱流との関係を調べる研究が行われてきている。しかしながら、DNS を用いた研究の多くは、4 m<sup>3</sup> 程度のボックス内の粒径分布を解くに留まり、一方 LES を用いた数値実験の多くは 100 m スケールの格子幅を用いるため、重要なメートルスケール程度の乱流混合の影響を陽には解くことはできなかった。すなわち、これらのアプローチには大きなスケールギャップが存在する。不確実性の低減につながる理解を得るためには、そのスケールギャップを埋めることのできるアプローチが求められる状況であった。

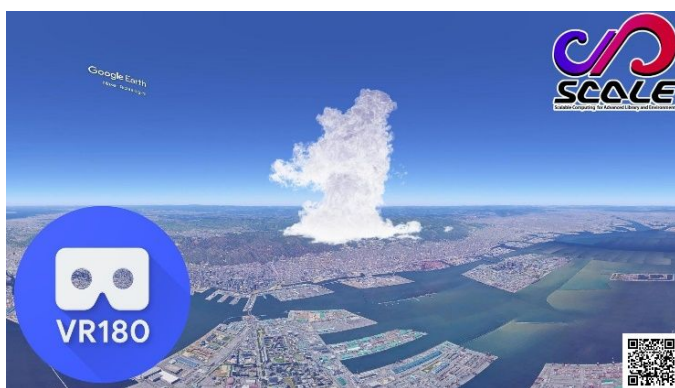


図 1：超水滴法による、雄大積雲の数値シミュレーション (QR コードは、研究のアウトリーチ活動で用いた youtube 上の VR 動画へのリンク)

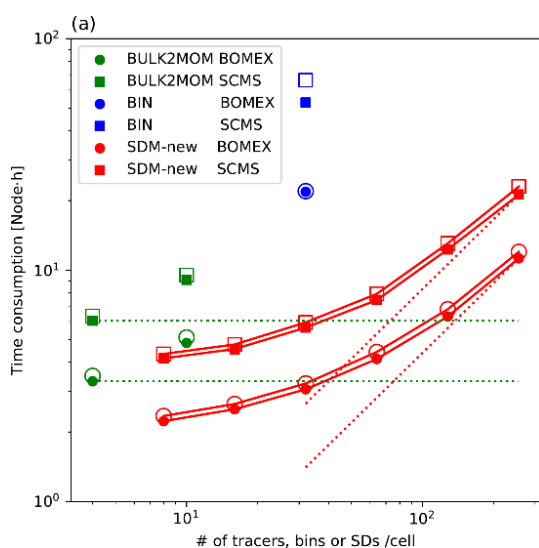


図 2：バルク法、ピン法、超水滴法を用いた、浅い積雲集団 (BOMEX)、雄大積雲 (SCMS) のテストケースの数値実験の実行にかかった経過時間 (ノード時間積) の、格子あたりトレーサー数依存性

### 2. 研究の目的

このような背景のもと、本研究課題の目的は、気象・気候シミュレーションの不確実性を低減するため、微細スケール(DNS)と気象・気候スケール(LES)のスケールギャップを埋める、超高解像度の数値シミュレーションが可能な新しい数値モデルを開発し、広範なダイナミックレンジにおける雲微物理と乱流の相互作用の理解に繋げることである。

### 3. 研究の方法

我々はラグランジュ粒子ベース雲微物理法である超水滴法(Shima et al., 2009; Shima et al., 2020)に着目する。超水滴法は、莫大な雲内の水滴から、代表的な水滴をサンプリングし、その水滴(超水滴)に対して、原理的な方法に基づく凝結成長や水滴の移流の計算と、モンテカルロ法に基づく衝突併合を解く。しかし、超水滴法を用いた計算の計算コストは、粒径分布の統計のみを解くバルク法と比較して 30 倍程度あり、「京」コンピュータをもってしても、せいぜい 10 m 解像度程度の数値実験 (e.g. Matsushima et al., 2021) までしか行えなかった (図 1)。そこで、我々は超水滴法を用いた計算の最適化と、メートルスケールからサブメートルスケールの数値実験を可能にするアルゴリズム開発の両面から、スケールギャップを埋めるポテンシャルを持つ数値モデルを開発した。

#### 4. 研究成果

我々の研究成果(Matsushima et al., 2023, doi:10.5194/gmd-16-6211-2023)で特に重要な内容は大きくわけて3つに分けられる。

- (1) メートルスケールからサブメートルスケールの空間解像度では、低解像度の数値実験で用いられてきた超水滴のサンプリング手法が効率的ではなくなる。我々は、最適輸送理論を応用した新たなサンプリング手法を提案した。これにより、サンプリングの効率化を行い、新たな手法の適用によって、雲内の雲微物理量の変動をより精度よく推定可能になった。また、開発した方法を高解像度で用いることで、乱流と雲の相互作用に関わるパラメータをより精度よく推定することに繋がるのが期待される。
- (2) SDMの数値アルゴリズムを、特にスーパーコンピューター「富岳」上に向けた高度な最適化を行った。我々は、各超水滴がもつ情報を低容量に圧縮するほか、物理的・数値的知見(有効解像度に関する考察)に基づき、ループの簡略化を行った。図2は、従来のバルク法、粒径分布を固定したピンで離散化するピン法、超水滴法による、格子あたりの自由度に対する計算時間を示しており、我々の計算は、ピン法に比べて10倍、また超水滴数128個/cell程度までであれば、バルク法と同程度の計算資源を用いた数値実験が可能である。超水滴法では、雲微物理量が収束するためには、格子あたりの超水滴数が100個程度は必要ということが知られているため、この結果は重要である。また、物理性能の検証のため、開発した数値モデルを用いて、観測された雄大積雲を再現する数値シミュレーションを行ったところ、典型的な観測される特徴(例えば、高度ともに、粒径分布の平均半径と標準偏差が大きくなる特徴)を捉えることができていた。また、バルク法では表現できない、粒径分布が雲の断熱コアで狭くなる特徴を捉えることもできていた(図3)。そのため、開発した数値モデルは、物理的性能を犠牲にすることなく、計算性能の向上を実現できている。

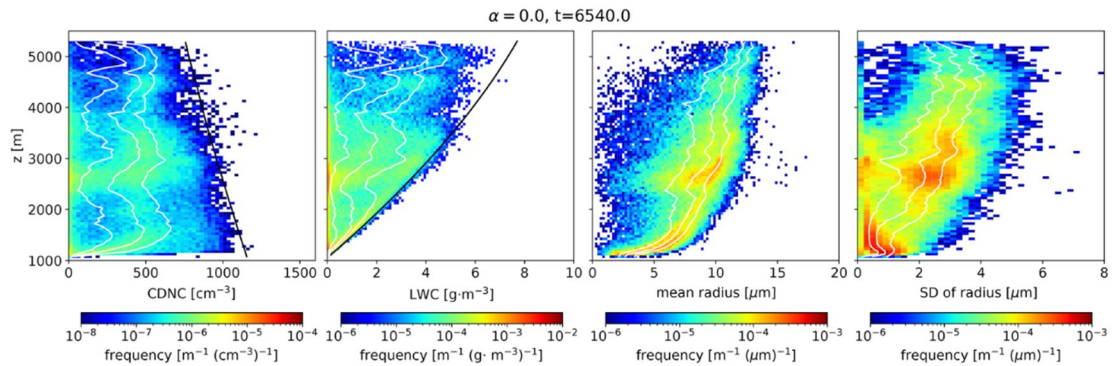


図3: 雄大積雲(SCMS)のテストケースで得られた、雲水数密度(CDNC)、雲水量(LWC)、平均半径、粒径分布の標準偏差の頻度の高度分布図

- (3) 開発した数値モデルを用いて、浅い雲の数値実験を、領域  $13824\text{m}^2 \times 3072\text{m}$  を  $2\text{m}$  解像度で覆い、格子あたりの超水滴数を平均128個/cellとして、「富岳」の全システムの約23%を用いて行った(図4)。この計算規模は、これまでの最高解像度の数値実験と比較して100倍以上の格子数と、442倍の超水滴数である。この評価実験の成功をもって、我々はスケールギャップを埋める数値モデルを手に入れることができた。



図4: 広い領域の計算で得られた場の、ある一つの雲の様子

Matsushima et al., 2023により、理想的な状況での計算性能の問題は解決されたが、この研究の制約は、直交座標系かつ平坦な領域に特化した数値アルゴリズムと最適化をベースとした、数値モデルを構築したことである。そのため、社会的に重要な状況である、地形の起伏がある場合や、全球的な気象・気候シミュレーションは、そのままのアルゴリズムで応用することはできない。しかし、本研究課題の終盤での検討によって、開発した数値アルゴリズムの性能を犠牲にすることなく「汎用性」を大きく向上させることの可能な新たな方向性を見出すことができた。研究課題終了後も、次のステップに向けて、新たな検討を進める計画である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Toshiki Matsushima, Seiya Nishizawa, Shin-ichiro Shima, Wojciech Grabowski	4. 巻 -
2. 論文標題 Intra-cloud Microphysical Variability Obtained from Large-eddy Simulations using the Super-droplet Method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Earth and Space Science Open Archive	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/essoar.10508672.1	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Matsushima Toshiki, Nishizawa Seiya, Shima Shin-ichiro	4. 巻 16
2. 論文標題 Overcoming computational challenges to realize meter- to submeter-scale resolution in cloud simulations using the super-droplet method	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Geoscientific Model Development	6. 最初と最後の頁 6211 ~ 6245
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5194/gmd-16-6211-2023	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 松嶋俊樹
2. 発表標題 超水滴法による浅い雲の超高解像度数値実験を可能にする 数値モデルの開発
3. 学会等名 気象学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Toshiki Matsushima
2. 発表標題 Numerical model to enable ultra-high-resolution simulations of shallow clouds using the super-droplet method
3. 学会等名 AGU Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Toshiki Matsushima
2. 発表標題 Numerical model to enable ultra-high-resolution simulations of shallow clouds using the super-droplet method
3. 学会等名 103rd AMS Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松嶋俊樹, 末木健太
2. 発表標題 VRを用いた気象・気候シミュレーション空間の可視化
3. 学会等名 日本気象学会春季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松嶋俊樹
2. 発表標題 超水滴法による革新的な雲のシミュレーション：メートルからサブメートルスケール解像度の実現および、全球領域への応用に向けて
3. 学会等名 第3回「富岳」成果創出加速プログラム研究交流会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>微速度撮影された雲の様子を観察してみよう：「京」コンピュータを使ったシミュレーション編 1  <a href="https://www.youtube.com/watch?v=7-XXq11Jtcw">https://www.youtube.com/watch?v=7-XXq11Jtcw</a>          微速度撮影された雲の様子を観察してみよう：「京」コンピュータを使ったシミュレーション編 2  <a href="https://www.youtube.com/watch?v=dxo1dczz-gc">https://www.youtube.com/watch?v=dxo1dczz-gc</a></p>
---

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
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	National Center for Atmospheric Research			