

令和 6 年 5 月 22 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H01974

研究課題名（和文）大気乱流および積雲対流のスケール間相互作用

研究課題名（英文）multi-scale interactions between atmospheric turbulence and cumulus convection

研究代表者

西澤 誠也（Nishizawa, Seiya）

国立研究開発法人理化学研究所・計算科学研究センター・上級研究員

研究者番号：40447892

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 17,230,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、0(1 km) 以下のスケールをもつ大気乱流と、0(10 km) スケールである積雲対流との間の相互作用の理解を目指した。大気乱流と積雲対流の両方を陽に解像する複数のラージエディシミュレーション実験を実施し、両者の関係について、多角的な観点から解析を行った。その結果、積雲対流やその自己組織化に対する、小スケール地形に起因する乱流や境界層内の乱流の寄与を明らかにすることが出来た。一方で、その相互作用について、包括的な理解には至っておらず、今後さらなる研究を進める必要がある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大気乱流の研究は、これまで乾燥大気を対象としたものが多かった。一方で、積雲対流は相変化を伴う湿潤過程を含んでおり、極めて非線形性の高い現象である。本研究で、乱流の影響が、湿潤過程を通じて増幅される効果があることが分かった。これらの知見により、今後、大気乱流の研究において、これまでの乾燥大気における大気乱流研究を超えた、新しい展開が開けることが期待される。

研究成果の概要（英文）：This study aimed to understand the interaction between atmospheric turbulence, which has a scale of less than 0(1 km), and cumulus convection, which has a scale of 0(10 km). Multiple large-eddy simulation experiments were conducted to explicitly resolve both atmospheric turbulence and cumulus convection, and the relationship between the two was analyzed from multiple perspectives. As a result, we were able to clarify the contribution of turbulence caused by small-scale topography and turbulence in the boundary layer to cumulus convection and its self-organization. On the other hand, a comprehensive understanding of their interaction has not yet been achieved, and further research is needed.

研究分野：気象学

キーワード：大気乱流 積雲対流 スケール間相互作用

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

大気変動には様々な時空間スケールの変動が含まれており、それらは相互作用しあっている。O(10 km) スケールである積雲対流とそれよりも大きな変動の相互作用は様々な研究がなされている。例えば、積雲対流が自己組織化し、O(100 km) スケールの線状降水帯を形成したり、赤道域においてはマッデンジュリアン振動とよばれる O(1000 km) スケールの雲活動活発域を形成したりすることが分かっている。

積乱雲よりも小さなスケールの大気現象として、大気乱流が挙げられる。大気乱流が大規模現象にあたえる影響は無視できないことが知られている。例えば、境界層乱流と呼ばれる地表面付近の乱流は熱や水蒸気等の鉛直輸送に大きく寄与している。これまでの我々の研究において、積雲対流スケールよりも小さな地形の凹凸により励起された境界層乱流が、積雲対流の組織化を阻害することにより夏季晴天時の熱雷による降水強度を低下させることを明らかになってきた。このことは、境界層乱流と積雲対流が相互に影響し合っている、つまりスケール間相互作用が存在することを示している。

大気乱流として、雲内部の乱流も重要である。雲の境界面付近では、乱流が雲内部と雲外部の空気を混合することにより、雲活動の強さや持続時間に大きく影響を与えていることが知られている。また、研究協力者の島らとともに現在行っている共同研究において、雲内部の乱流ゆらぎにより過飽和度に非一様性が生じることで雲粒子の特徴量の多様性が増加し(例えば、粒径分布が広がる)、その結果降水のタイミングや降水量に大きな影響を与えることが分かっていた。乱流渦が存在すると、雲粒子が渦にトラップされ、粒子分布に強い非一様性が生じる。水蒸気-液水-氷間の相変化は強い非線形性を有するため、空間非一様性が増幅され、場に大きな影響を与えることが示唆されている。

このように、大気乱流と積雲対流の間には相互作用が存在し、その相互作用は大気変動の理解にとって重要であることが明らかになってきた。しかしながら、大気乱流は、時空間スケールが小さな現象であるため、観測や実験が容易ではない。これまでの研究は、個別要素に関するものが多く、大気乱流とより大きなスケールの現象との相互影響を巨視的に行う研究は限定的である。したがって、大気乱流と他現象との相互作用については、多くの仮定に基づく統計法則や経験的法則を得るにとどまっている。大気乱流を含むスケール間相互作用については不確実な部分が多く、大気現象を理解する上で残された課題である。

乱流-積雲対流相互作用の理解が進んでいないことは、数値シミュレーションにおける個々の対流活動の再現性に大きな不確実性をもたらしめている。ゲリラ豪雨と呼ばれるような局所的突発的な降雨活動の予測精度を高めるためには、大気乱流と積雲対流の相互影響の理解を深め、それらの相互作用効果を適切に数値シミュレーションに取り込むことが必要である。

### 2. 研究の目的

これまで、大気乱流がより大きなスケールの大気現象にあたえる影響は、多くの仮定にもとづく統計法則や経験則によって理解されてきた。本研究では、高解像度数値計算を用いて物理法則に基づいた評価や理解を行うことで、大気乱流と積雲対流との相互作用の本質的理解を目指すとともに、定量的な影響評価を行う。

大気乱流の研究は、これまで乾燥大気を対象としたものが多かった。一方で、積雲対流は相変化を伴う湿潤過程を含んでおり、極めて非線形性の高い現象である。したがって、乱流の影響が強非線形の湿潤過程を通じて増幅または減衰される可能性がある。したがって、本研究は、これまでの乾燥大気における大気乱流研究の予想範囲を超えた、新しい展開を与えることが期待される。

スケール間相互作用研究のための数値計算における障壁のひとつは、両者を同時に表現するためには、対象とする時空間スケールのダイナミックレンジが大きいことである。つまり、広い計算領域と高い解像度が同時に要求される。本研究目的のためには、O(10 km) スケールの積雲対流を表現するための O(100 km) スケール以上の計算領域と、O(1 km) スケール以下の大気乱流を解像するための O(100 m) スケールの解像度が必要である。本研究は、大気乱流や積雲対流を個別に議論する多くの既存研究とは異なり、両者を同時に表現する数値シミュレーションにより、スケール間の相互作用の理解を目指すものである。

### 3. 研究の方法

本研究では、O(1 km) 以下のスケールをもつ大気乱流が、それによる熱や水蒸気の混合を通じて、O(10 km) スケールである積雲対流に大きな影響を調べるため、両者を同時に表現するラージエディシミュレーション実験を行った。積雲対流を対象とした研究においては、積雲対流の多様性が大きな課題の一つであり、総合的な理解のために、複数の事例の実験を行い、個々事例のそれぞれの把握だけでなく、それらを俯瞰することで共通する特徴や各事例の個性をもたらし要因の分析を行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) 積雲対流に対するサブメソスケールの地形の影響の理解

大気境界層における大気乱流の生成に寄与する  $O(100\text{ m})$  スケールの地形が積雲対流にあたえる影響について研究を行った。 $100\text{ m}$  解像度のラージエディシミュレーションを行い、小スケールの地形の有無による積雲対流の違いを調べ、その違いをもたらす物理的メカニズムの解明を試みた。そして、 $O(100\text{ m})$  スケールの地形は、乱流を通じて地表面付近の流れの剥離を促すことにより、上昇流を分散させ、谷風を弱めることが分かった。そして、その結果として、尾根域に生じる強い積雲対流およびそれによる降水を抑制することを明らかにした。また、尾根域の降水の結果として生じるコールドプールがその小スケールの地形による降水の抑制効果を増幅させ、尾根域だけでなく谷域における降水にまで大きな違いをもたらすことを明らかにした。

##### (2) 雲内の微物理特性の理解

孤立積雲を対象として、革新的な雲微物理計算手法であるラグランジュ粒子ベースの超水滴法 (Shima et al. 2009, 2020) を用いたラージエディシミュレーションを行い、雲壁における乱流混合による雲内の微物理特性の変動を調べた。雲壁における混合は、雲内の過飽和度を変化させ、雲粒子の蒸発などを通じて雲粒子のサイズ分布を変化させる。雲物理と混合の時間スケールの大小によりサイズ分布の変化が異なるが、雲壁における混合や雲粒子のサイズ分布を陽に表現した数値計算を行うことはこれまで困難であり、その理解は未だ十分ではなかった。本研究では、最大  $12.5\text{ m}$  の高解像度で、雲粒子のサイズ分布を陽に表現することができる超水滴法を用いることで、雲壁における混合による雲内の微物理特性の変動を陽に表現する数値実験を行った。混合が無い場合(断熱過程)に対する雲水量の比や雲粒子の有効半径などの雲微物理特性を調べ、その雲内での場所による違いなどを明らかにした。また、得られた特徴は、理論的に知られている均一混合の値とは異なっており、不均一混合が起こっていることを示唆していた。

##### (3) 大気乱流と積雲対流の相互作用の理解

大気乱流と積雲対流をともに陽に解像するラージエディシミュレーション実験を行うことにより、その相互作用を明らかにすることを試みた。積雲対流の自己組織化について、境界層内の運動が大きく寄与していることが分かった。また、大気乱流および積雲対流は非線形が強い現象であるため、カオス性に起因する不確実性に関する影響評価も行った。これらにより、大気乱流および積雲対流のスケール間相互作用について、その性質を多角的な観点から明らかにすることが出来た。一方で、これらの間の相互作用については、まだ未解明な点も多く、今後さらなる研究を続けていくことが重要である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Nishizawa Seiya, Yamaura Tsuyoshi, Kajikawa Yoshiyuki	4. 巻 78
2. 論文標題 Influence of sub-mesoscale topography on daytime precipitation associated with thermally driven local circulations over a mountainous region	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Atmospheric Sciences	6. 最初と最後の頁 2511-2532
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1175/JAS-D-20-0332.1	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 -
1. 著者名 Matsushima Toshiki, Nishizawa Seiya, Shima Shin-ichiro, Grabowski Wojciech	4. 巻 17
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 Yanase Tomoro, Nishizawa Seiya, Miura Hiroaki, Takemi Tetsuya, Tomita Hirofumi	4. 巻 47
2. 論文標題 New Critical Length for the Onset of Self Aggregation of Moist Convection	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	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) 10.1029/2020GL088763	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 -
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6件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 西澤誠也
2. 発表標題 ニューラルネットワーク代理モデルを用いた4次元変分法データ同化
3. 学会等名 気象学会2021年度秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nishizawa, S., T. Yamaura, and Y. Kajikawa
2. 発表標題 Influence of sub-mesoscale topography on daytime precipitation associated with thermally driven local circulations over a mountainous region
3. 学会等名 The Fifth Convection-Permitting Modeling Workshop 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nishizawa, S.
2. 発表標題 Our model development activities and prospects in cloud resolving simulations
3. 学会等名 International WS Convection-Permitting Modeling for Climate Research Current and Future Challenges (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Matsushima, T., S. Nishizawa, and S. Shima
2. 発表標題 Large-Eddy Simulations of Cumulus Congestus Cloud Using Super Droplet Method
3. 学会等名 39th International Conference on Radar Meteorology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松嶋俊樹, 西澤誠也, 島伸一郎
2. 発表標題 超水滴法を用いた雄大積雲のラージ・エディ・シュミレーション
3. 学会等名 日本流体力学学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松嶋俊樹, 西澤誠也, 島伸一郎, W. Grabowski
2. 発表標題 超水滴法を用いた雄大積雲のラージ・エディ・シュミレーション
3. 学会等名 日本気象学会2019年度秋季大会
4. 発表年 2019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	島 伸一郎  (Shima Shin-ichiro)		
研究協力者	松嶋 俊樹  (Matsushima Toshiki)		

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