

令和 2 年 6 月 29 日現在

機関番号：82706

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14598

研究課題名(和文)重力沈降する球形および非球形慣性粒子の非等方乱流クラスタリング機構の解明

研究課題名(英文) Anisotropic turbulent clustering mechanism of gravitational-settling spherical and nonspherical inertial particles

研究代表者

松田 景吾 (Matsuda, Keigo)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・付加価値情報創生部門(地球情報基盤センター)・研究員

研究者番号：50633880

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：乱流中での雲粒子の不均一分布(乱流クラスタリング)によって気象レーダー観測における反射強度が増加する効果について、粒子を含む大規模乱流の直接数値計算を用いて調べた。重力沈降の影響および複数粒径の雲粒が混在する影響を考慮したレーダー反射強度増加量を推定するモデル式を構築し、現実的な対流雲のレーダー観測における乱流クラスタリングの効果を定量的に解明した。さらに、氷粒子(非球形粒子)の乱流クラスタリングの効果も明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、雲粒子の乱流クラスタリングによるレーダー反射因子の増加量を定量的に推定することが可能となった。本研究で構築したモデル式を応用することでレーダー観測によって対流雲中の乱流状態を推定できる可能性がある。対流雲中の乱流は衝突併合による雲粒の成長を促進させることから、レーダー観測によって対流雲中の乱流状態を推定することにより、突発的豪雨の早期検知に役立つ可能性が期待される。

研究成果の概要(英文)：Effects of nonuniform cloud particle distribution in turbulence (turbulent clustering) on increase of the radar reflectivity in cloud observations were investigated using a direct numerical simulation of particle-laden turbulence. A model to predict the increase of radar reflectivity was developed considering the influence of gravitational settling and polydisperse particle sizes, and the effects of turbulent clustering in radar observations of realistic convective clouds were presented quantitatively. In addition, the effects of turbulent clustering of ice particles (non-spherical particles) were clarified.

研究分野：熱流体工学

キーワード：乱流 混相流 雲 直接数値シミュレーション レーダー観測

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

雲レーダーは地上から雲の状態を観測することのできる極めて有用なツールである。雲のレーダー観測では、アンテナからマイクロ波を雲に向けて照射し、アンテナの方向への反射強度を測定する。このとき、雲粒の大きさや分布状態に依存するレーダー反射強度は、レーダー反射因子 Z によって表され、 Z を用いて雲微物理量の推定が行われる。通常、雲微物理量の推定では、液滴が一様ランダムに分散しているという仮定に基づいた関係式が用いられる。しかし、雲の中は高レイノルズ数の乱流状態であり、また、雲粒などの慣性粒子は乱流中において非一様な空間分布(乱流クラスタリング)を示すことが知られている。さらに近年の研究で、雲粒の乱流クラスタリングがレーダー反射因子を増加させる可能性が指摘されている。Matsuda et al.(文献)は、乱流の直接数値シミュレーション(direct numerical simulation, DNS)を用いて、粒径が均一な場合の数密度変動のポワースペクトルをモデル化することにより、乱流クラスタリングがレーダー反射因子に及ぼす影響を明らかにした。乱流クラスタリングによるレーダー反射因子の増加量を定量的に評価できれば、レーダー観測によって対流雲中の乱流状態を推定できる可能性がある。対流雲中の乱流は衝突併合による雲粒の成長を促進させることから、突発的豪雨の早期検知に役立つ可能性がある。しかし、これまでに提案されているモデルは重力沈降がない場合の均一な粒径の場合に対するものであるため、実際の対流雲のように重力沈降があり、複数の粒径が混在する場合に対しては直接には適用できない。さらに、これまでは球形の水滴のみを対象としてきたが、実際の対流雲は非球形の氷粒子を含んでいる。そのため、乱流クラスタリングによるレーダー反射因子の増加量の定量的な評価に至るまでには、重力沈降によるクラスタリングの非等方性の影響、複数の雲粒サイズが混在する場合の乱流クラスタリングの影響、および非球形粒子の場合の乱流クラスタリングの影響を明らかにすることが必要であった。

2. 研究の目的

本研究では、雲粒の乱流クラスタリングが雲のレーダー反射因子に及ぼす影響を定量的に明らかにするために、重力沈降による非等方クラスタリングの影響、複数の雲粒サイズが混在する場合の乱流クラスタリングの影響、および非球形粒子の場合の乱流クラスタリングの影響を解明し、乱流クラスタリングの影響を考慮したレーダー反射因子の増加量を推定するモデルを構築することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) レーダー反射因子と数密度変動スペクトルの関係

雲粒の乱流クラスタリングを考慮したレーダー反射因子 Z は次式により与えられる。

$$Z = 2^6 \langle r_p^6 \rangle \langle n_p \rangle + 2^7 \pi^2 \kappa^{-2} E_{r_{3np}}(k) \quad (1)$$

ここで、 r_p は液滴半径、 $\langle n_p \rangle$ は平均数密度、 κ はマイクロ波の波数に比例する特性波数である。第2項が乱流クラスタリングの影響を表している。 $E_{r_{3np}}(k)$ は数密度変動の重み付きポワースペクトルであり、次式で定義される(文献)。

$$E_{r_{3np}}(k) = \int_0^\infty r_p^3 r_p'^3 q_r(r_p) q_r(r_p') C_{np}(k|r_p, r_p') dr_p dr_p' \quad (2)$$

ここで、 $q_r(r_p)$ は粒子半径の確率密度関数、 $C_{np}(k|r_p, r_p')$ は半径 r_p および r_p' の液滴の数密度分布 $n_p(x|r_p)$ および $n_p(x|r_p')$ に関するクロススペクトルである。なお、粒径が均一な場合には $E_{r_{3np}}(k)$ は数密度変動のポワースペクトル $E_{np}(k|r_p)$ に等しくなる。既往研究(文献)において、数密度変動のポワースペクトルは粒子サイズに強く依存することが確認されている。式(1)および(2)より、2粒径間の数密度変動のクロススペクトルが与えられれば、多数の粒子径が混在する場合の乱流クラスタリングが Z に及ぼす影響を評価することができる。

(2) 球形粒子を含む乱流場のDNS

乱流クラスタリングによる数密度変動のポワースペクトルおよびクロススペクトルが乱流パラメータにどのように依存するかを調べるため、粒子の分散を伴う三次元一様等方性乱流場のDNSを実行した。DNSには、Lagrangian Cloud Simulator (LCS)(文献)を用いた。周期境界条件を設定した立方体の計算領域を設定した。乱流場の支配方程式は非圧縮流体の連続の式とNavier-Stokes方程式である。大スケール渦の運動エネルギーが保たれるよう強制外力を与え、定常等方性乱流場を形成した。乱流中の水滴については、個々の球形粒子を質点としてLagrangian法により追跡した。なお、水の密度は空気の密度に比べて十分に大きいため、流体抗力項と重力項より成る粒子の運動方程式を用いた。実際の雲のように十分に希薄な粒子体積密度を想定するため、粒子による乱流変動および粒子間衝突の影響は無視することができる。

(3) 非球形粒子の乱流クラスタリングデータ

DNSにおいて非球形粒子の運動を追跡するには、粒子位置と粒子速度の他に、粒子方位と粒子回転速度を計算しなければならない。Siewert et al.(文献)は非球形(回転楕円体)粒子の運動方程式の定式化し、DNSにより乱流中の非球形粒子の運動の追跡に成功した。そこで、このDNSデータを用いて数密度変動スペクトルを算出した。

4. 研究成果

(1) 重力沈降による非等方クラスタリングの影響

粒径が均一な場合に、重力沈降による乱流クラスタリングの構造の変化を調べた。重力沈降の影響の大きさは、重力沈降速度 v_T とコルモゴロフ速度 u_η の比率を表す沈降パラメータ $S_v = v_T/u_\eta$ によって整理することができる。重力沈降がない場合 ($S_v = 0.0$) と比較的速い重力沈降速度を持つ場合 ($S_v = 11.0$) を比較すると、重力沈降がある場合ではクラスタが鉛直方向に引き延ばされるカーテン状クラスタが現れる。このとき、粒径が均一な場合の数密度変動のワースペクトル $E_{np}(k|r_p)$ には強度が低下する傾向が見られる(図1)。さらにスペクトルを水平方向 $E_{np,h}(k)$ と鉛直方向 $E_{np,v}(k)$ に分けて算出すると、鉛直方向のスペクトルの強度低下が顕著であることを明らかにした。また、 S_v が3より小さければ、数密度変動のワースペクトル $E_{np}(k|r_p)$ に及ぼす重力沈降の影響は小さいことを明らかにした。

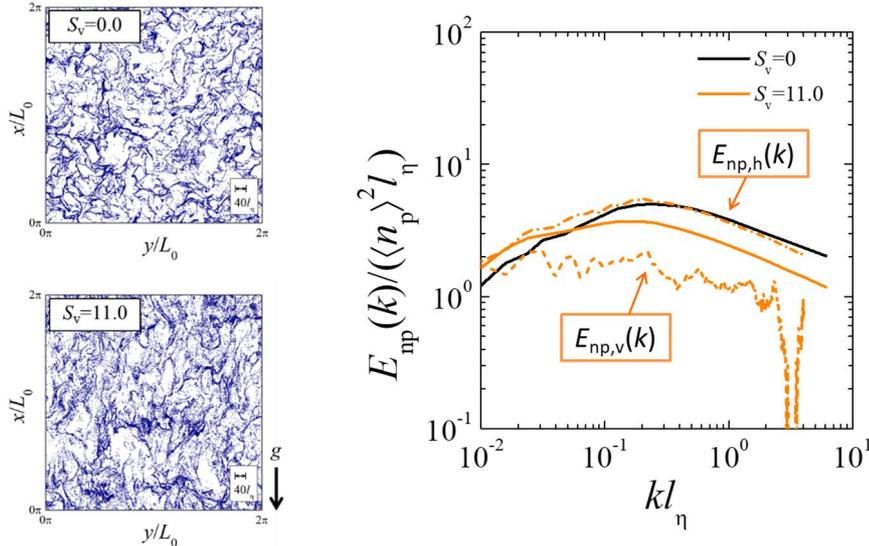


図1 重力沈降による粒子分布の変化(左)および数密度変動スペクトル(右)。

(2) 複数の雲粒サイズが混在する場合の乱流クラスタリングの影響

乱流中における粒子の慣性力はストークス数 $St = \tau_p/\tau_\eta$ (τ_p は粒子運動の緩和時間、 τ_η は乱流のコルモゴロフ時間)によって表され、粒径の違いはストークス数の違いとみなすことができる。

DNS データより得られたクロススペクトルの性質を把握するためにコヒーレンスを算出した結果、コヒーレンスは低波数域では1に近い値を示すが、高波数になるにつれて指数関数的に減少することが明らかとなった。その減少傾向がストークス数の組み合わせによって異なることから、指数関数の減衰係数に相当する閾波数を算出し、ストークス数との関係を調べた。その結果、閾波数はストークス数差の逆数に近似的に比例することが明らかとなった。以上の結果から、重力沈降がない場合について、複数の雲粒サイズが混在する場合の乱流クラスタリングがレーダー反射因子に及ぼす影響を推定するモデル式を構築することに成功した(文献)。

本研究ではさらに、弱い重力沈降の影響を考慮することを試みた。上述のように、沈降パラメータ S_v が3より小さければ、粒径が均一な場合のワースペクトル $E_{np}(k|r_p)$ に及ぼす重力沈降の影響は小さい。しかし、複数粒径が混在する場合には、重力沈降速度の違いの影響を考慮しなければならない。これまでの結果から、本研究で得た閾波数が Chun et al. (文献)による2粒径間の動径分布関数のクロスオーバー長の逆数と関連することが示唆されていた。また、Lu et al. (文献)は Chun et al.の解析手法に基づいて重力沈降がある場合のクロスオーバー長の定式化を行っていた。これらの知見に基づき、本研究ではレーダー反射因子推定モデル式に対し、重力沈降の影響を考慮した修正を行った(文献)。

構築したモデルの信頼性を検証するため、海洋上の積雲の典型的な粒径分布(文献)を設定したDNSを実行し、重力沈降がある場合とない場合の重み付きワースペクトル $E_{r3np}(k)$ を算出した(図2)。構築したモデル式を用いて推定したスペクトルを破線で示している。モデル式

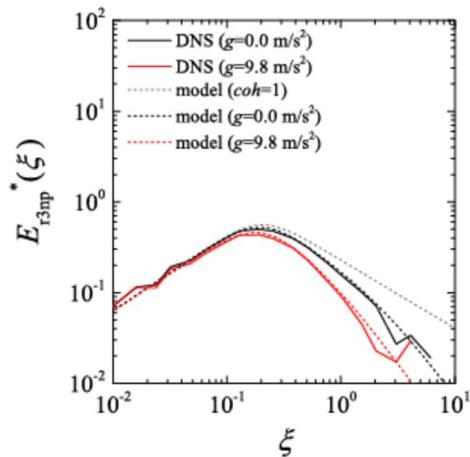


図2 DNSにより得られた数密度変動スペクトル $E_{r3np}^*(\xi)$ と構築したモデルによる推定値の比較。 ξ はコルモゴロフ長で規格化した波数。

を用いて推定した $E_{r3np}^*(\xi)$ は、重力がある場合とない場合の両方で、DNSの結果に基づいて算出した $E_{r3np}^*(\xi)$ とよく一致しており、本研究で構築した数密度スペクトルモデルが、広がりのある粒径分布を持ち、重力沈降を伴う雲粒の乱流クラスタリングの効果を精度よく再現することができることが示された。

乱流クラスタリングが実際の積雲のレーダー反射強度に及ぼす影響を定量的に明らかにするために、構築したモデルを高解像度雲シミュレーションデータ(文献)に適用した。式(2)の第1項(従来のレーダー反射強度)および第2項(乱流クラスタリングの影響)に加え、大気乱流による温度・水蒸気量変動の影響を考慮して、レーダー反射強度を算出した。その結果、比較的雲水量が多く、乱流強度の大きい積雲において、乱流クラスタリングの影響によってレーダー反射強度が顕著に増加しうることが明らかとなった(図3)。これは、現実的な積雲のデータを用いて、乱流クラスタリングがレーダー反射強度に及ぼす影響を定量的に明らかにした世界初の成果である。

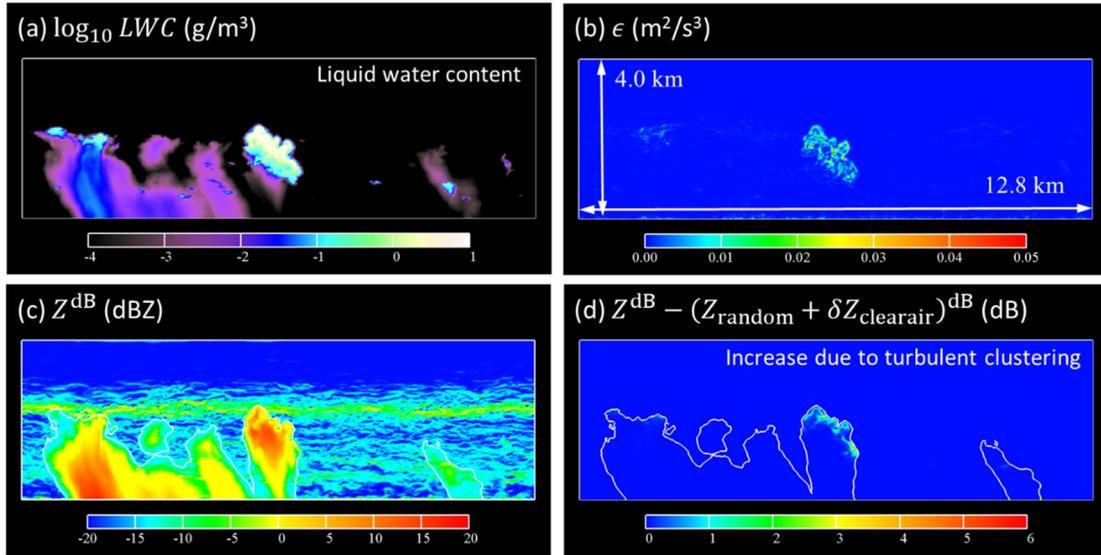


図3 高解像度雲シミュレーションデータにおける鉛直断面上の(a)雲水量，(b)乱流エネルギー散逸率，(c)レーダー反射強度，および(d)乱流クラスタリングによるレーダー反射強度の増分。

(3) 非球形粒子の場合の乱流クラスタリングの影響

Siewert et al.(文献)の非球形(回転楕円体)粒子についてのDNSデータを用いて数密度変動スペクトルを算出した(図4)。彼らのDNSは風洞を模擬した計算条件であるほか、我々のDNSに比べて乱流レイノルズ数が低いなど、計算条件に違いがある。しかし、数密度変動スペクトルには、粒子の乱流クラスタリングが明確に観察された。アスペクト比 β が異なる5種類の粒子のスペクトルを比較した結果、球形($\beta = 1$)の場合にスペクトルの強度が最も大きく、非球形になると強度が低下する傾向があること、および、そのアスペクト比依存性はストークス数依存性に比べて小さいことが明らかになった。

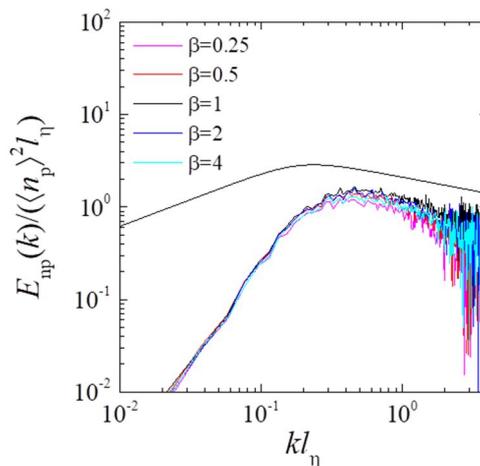


図4 回転楕円体粒子の乱流クラスタリングによる数密度変動スペクトル

本研究の成果により、雲粒子の乱流クラスタリングによるレーダー反射因子の増加量を定量的に推定することが可能となった。本研究で構築したモデル式を応用することでレーダー観測によって対流雲中の乱流状態を推定できる可能性がある。対流雲中の乱流は衝突併合による雲粒の成長を促進させることから、レーダー観測によって対流雲中の乱流状態を推定することにより、突発的豪雨の早期検知に役立つ可能性が期待される。

参考文献

- Matsuda, K. et al., "Influence of Microscale Turbulent Droplet Clustering on Radar Cloud Observations," J. Atmos. Sci., 71 (2013), pp. 3569-3582.
- Matsuda, K., Onishi, R. and Takahashi, K., "Influence of gravitational settling on

turbulent droplet clustering and radar reflectivity factor," *Flow Turb. Combust.*, 98 (2017), pp. 327-340.

Matsuda, K. and Onishi, R., "Turbulent enhancement of radar reflectivity factor for polydisperse cloud droplets," *Atmos. Chem. Phys.*, 19 (2019), pp. 1785-1799.

Onishi, R., Matsuda, K. and Takahashi, K., "Lagrangian Tracking Simulation of Droplet Growth in Turbulence - Turbulence Enhancement of Autoconversion Rate," *J. Atmos. Sci.*, 72 (2015), pp. 2591-2607.

Kunishima, Y. and Onishi, R., "Direct Lagrangian tracking simulation of droplet growth in vertically developing cloud," *Atmos. Chem. Phys.*, 18 (2018), pp. 16619-16630.

Siewert, C. et al., "Orientation statistics and settling velocity of ellipsoids in decaying turbulence," *Atmos. Res.*, 142 (2014), pp. 45-56.

Chun, J., Koch, D., Rani, S., Ahluwalia, A., and Collins, L., "Clustering of aerosol particles in isotropic turbulence," *J. Fluid Mech.*, 536 (2005), pp. 219-251.

Lu, J., Nordslek, H., and Shaw, R., "Clustering of settling charged particles in turbulence: theory and experiments," *New J. Phys.*, 12 (2010), 123030.

Hess, M., Koepke, P., and Schult, I., "Optical Properties of Aerosols and Clouds: The Software Package OPAC," *B. Am. Meteorol. Soc.*, 79 (1998), pp. 831-844.

Onishi, R. and Takahashi, K., "A Warm-Bin - Cold-Bulk Hybrid Cloud Microphysical Model," *J. Atmos. Sci.*, 69 (2012), pp. 1474-1497.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Matsuda Keigo, Onishi Ryo	4. 巻 19
2. 論文標題 Turbulent enhancement of radar reflectivity factor for polydisperse cloud droplets	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Atmospheric Chemistry and Physics	6. 最初と最後の頁 1785 ~ 1799
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5194/acp-19-1785-2019	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 Matsuda Keigo, Onishi Ryo	4. 巻 -
2. 論文標題 Turbulent enhancement of radar reflectivity factor for polydisperse cloud droplets	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Atmospheric Chemistry and Physics Discussions	6. 最初と最後の頁 1 ~ 21
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5194/acp-2018-480	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 T. Ariki, K. Yoshida, K. Matsuda and K. Yoshimatsu	4. 巻 97
2. 論文標題 Scale-similar clustering of heavy particles in the inertial range of turbulence	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 33109
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevE.97.033109	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 1件/うち国際学会 14件）

1. 発表者名 K. Matsuda, R. Onishi
2. 発表標題 Enhancement of radar reflectivity factor due to turbulent droplet clustering in cumulus clouds
3. 学会等名 Workshop on Eulerian vs. Lagrangian methods for cloud microphysics（国際学会）
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Matsuda, K. Schneider, K. Yoshimatsu
2 . 発表標題 Intermittency of inertial particle distribution in high Reynolds number turbulence
3 . 学会等名 17th European Turbulence Conference (ETC17) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Matsuda, K. Schneider, K. Yoshimatsu
2 . 発表標題 Inertial particle distribution in high Reynolds number turbulence: wavelet-based scale-dependent statistics
3 . 学会等名 72nd Annual Meeting of the American Physical Society Division of Fluid Dynamics (APS/DFD 2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Thibault Ujia, Keigo Matsuda, Kai Schneider
2 . 発表標題 Divergence and convergence of inertial particles in high Reynolds number turbulence
3 . 学会等名 72nd Annual Meeting of the American Physical Society Division of Fluid Dynamics (APS/DFD 2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Matsuda
2 . 発表標題 Statistical modeling of inertial droplet clustering in cloud turbulence
3 . 学会等名 International Workshop on Multiphase Turbulence and Statistical Modeling (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Matsuda
2. 発表標題 Scale-dependent and directional statistics of inertial particle clustering in high Reynolds number turbulence using wavelet analysis
3. 学会等名 Workshop on Wavelet & CFD (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Matsuda, K. Schneider, K. Yoshimatsu
2. 発表標題 Multiscale analyses of inertial particle clustering in homogeneous isotropic turbulence
3. 学会等名 4th International Workshop on Marine-Earth Science Simulations: Data assimilation and multiscale techniques for numerical simulation of turbulent flows (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Matsuda, K. Schneider, K. Yoshimatsu
2. 発表標題 Wavelet-based multiscale analyses of inertial particle distribution in homogeneous isotropic turbulence
3. 学会等名 French-Japanese Workshop on Wavelet and Large Eddy Representations to Study Turbulent Flows (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松田景吾, 大西 領
2. 発表標題 雲粒の乱流クラスタリングによる雲レーダー反射強度増強効果のモデル化：粒径分布および重力沈降の影響
3. 学会等名 日本流体力学会年会2019
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 Matsuda Keigo, Onishi Ryo
2 . 発表標題 Radar reflectivity factor enhancement due to microscale turbulent clustering of polydispersed cloud droplets
3 . 学会等名 AMS 15th Conference on Cloud Physics/ 15th Conference on Atmospheric Radiation (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Matsuda Keigo, Onishi Ryo
2 . 発表標題 Cloud radar reflectivity factor enhancement due to turbulent droplet clustering
3 . 学会等名 GDR Turbulence Meeting (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 K. Matsuda, R. Onishi, K. Takahashi
2 . 発表標題 Enhancement of cloud radar reflectivity factor due to turbulent clustering of settling water droplets
3 . 学会等名 Turbulence Conference at Mauna Kea (TCM2017): Recent advances in turbulence research, 98th Annual Meeting of the American Association for the Advancement of Science (AAAS) Pacific Division (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 K. Matsuda, R. Onishi, K. Takahashi
2 . 発表標題 Multiscale turbulent clustering of bidispersed inertial particles in isotropic turbulence
3 . 学会等名 16th European Turbulence Conference (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1. 発表者名 K. Matsuda
2. 発表標題 Numerical study on cloud radar reflectivity enhancement due to turbulent droplet clustering
3. 学会等名 NITech Lectures on Turbulence and Cloud (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Ariki, K. Yoshida, K. Matsuda, K. Yoshimatsu
2. 発表標題 Scale similarity of the particle clustering in the inertial range of turbulence
3. 学会等名 Turbulence Conference at Mauna Kea (TCM2017): Recent advances in turbulence research, 98th Annual Meeting of the American Association for the Advancement of Science (AAAS) Pacific Division (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 有木健人, 吉田 恭, 松田景吾, 芳松克則
2. 発表標題 乱流慣性領域中の粒子クラスタリング
3. 学会等名 数理解析研究所研究集会「非一様乱流の数理」
4. 発表年 2017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