

# 地球科学分野における複雑乱流プロセスの数値研究

課題責任者

大西 領 海洋研究開発機構 地球情報基盤センター

著者

大西 領 海洋研究開発機構 地球情報基盤センター  
松田 景吾 海洋研究開発機構 地球情報基盤センター  
後藤 浩二 日本電気株式会社

海洋地球科学シミュレーションの高解像度化に伴いミクロスケールの複雑乱流プロセスの重要性が増しており、その解明と詳細なモデリングは予測シミュレーションの信頼性向上に直結する。例えば、乱流中で慣性粒子がクラスタリングを形成する現象や、乱流によって衝突頻度が増大される現象は、レーダー観測や雲微物理モデルにとって重要であることがわかっている。そこで、本研究課題では、大規模直接数値計算 (Direct Numerical Simulation, DNS) を用いて、混相乱流現象や非平衡乱流現象を解明し、新たなパラメタリゼーションの開発に資することを目的とする。

本年度は、新しい地球シミュレータを用いた大規模混相乱流 DNS によって、乱流中で慣性粒子がクラスタリングを形成する現象がレーダー観測に与える影響を明らかにすること、雲乱流が雲粒子の成長を促進する効果を考慮した新たな雲微物理モデルを構築することを目的とした。

**キーワード：**乱流, マルチスケールシミュレーション, 混相流, レーダー反射因子

## 1. 亂流クラスタリングとレーダー反射因子に及ぼす重力の影響

雲乱流によって雲粒が偏分布し、乱流クラスタリングを起こす現象が知られている。近年では、この乱流クラスタリングが熱放射過程やレーダー反射過程に及ぼす影響が注目されている [1]。本研究では、乱流中での慣性粒子の乱流クラスタリングを高精度に再現可能な混相乱流直接数値計算 (direct numerical simulation, DNS) により、雲粒の重力沈降が乱流クラスタリングとレーダー反射因

子に及ぼす影響について、解析を行った [2]。DNS により得られた乱流クラスタリングデータを可視化することにより、重力沈降速度とコルモゴロフ速度の比 ( $S_v$ ) が大きい場合には、乱流クラスタリングが鉛直方向に引き伸ばされた構造を持つことを明らかにした (図 1)。さらに、粒子の緩和時間とコルモゴロフ時間の比 (St) が 1 の場合について、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調べた。その結果、粒子径が大きく  $S_v$  が大きいほど、重力沈降がレーダー反射因子の増加に及ぼす影響が顕著になる様子を定量的に明らかにした (図 2)。これらの成果は、レーダー観測の精度向上に資する。

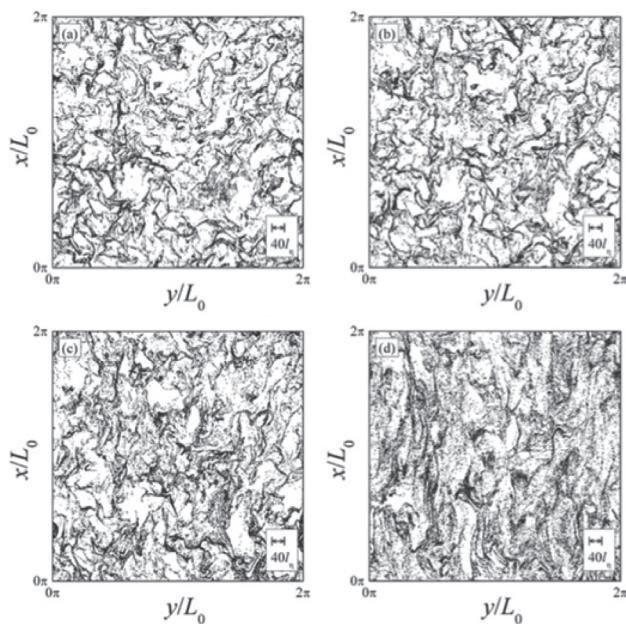


図 1  $Re_\lambda=204$  の乱流中における  $St=1$  の粒子の  $x$ - $y$  断面分布 ( $0 < z < 4l_\eta$  の範囲にある粒子)。(a) $S_v=0$ , (b) $S_v=2.68$ , (c) $S_v=6.79$  and (d) $S_v=19.3$ 。

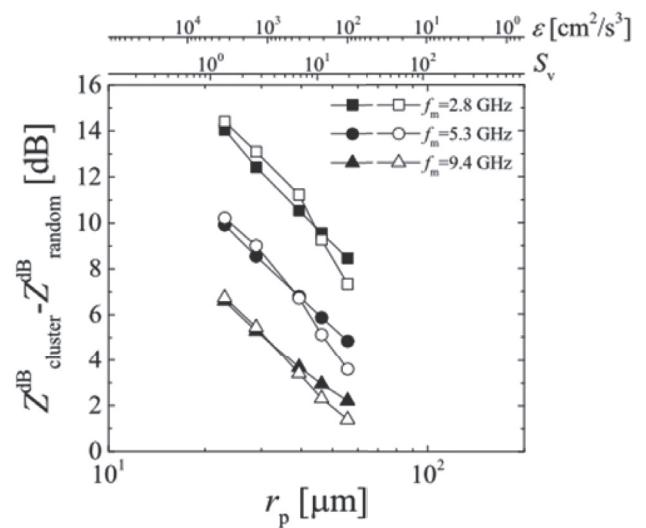


図 2 粒子体積率を  $10^{-6}$  と想定した場合の、乱流クラスタリングによるレーダ反射因子の増加量。

## 2. 雲乱流の効果を考慮した新たな雲微物理モデルの開発

大スケール強制法により定常3次元等方性乱流場を再現した上で、その中を運動する慣性粒子の運動をラグランジアン追跡法により計算し、粒子の乱流衝突統計量を取得し、既に開発してあった乱流衝突頻度モデル[3]を更新した。表1に、実施した大規模計算の設定を示す。本年度、新地球シミュレータシステムを用いて、 $8,192^3$ の流体格子と82億粒子を用いた大規模計算を実施した。この計算は新地球シミュレータクラスのスパコンでないと実施することはできない。

得られた乱流衝突統計量を用いて、近接粒子分布関数(クラスタリング効果)のレイノルズ数依存性を調べるとともに、間欠性起源説(Onishi & Vassilicos, 2014 [4])に基づいたモデル化を行った(図3)。さらに、雲粒子から雨粒子への成長速度を表すバルク autoconversion 項に与える乱流の影響をモデル化し、そのモデルの検証を行った(図4)[5]。本研究で開発したモデルによる予測結果はDNSによる結果とよく一致する。一方、現実の雲のような高レイノルズ数域(例えば、 $Re_\lambda=10,000$ )では、既存モデル(Ayala-Wang モデル)と本モデルでは倍以上も異なることが明らかになった。これは、さらなる高レイノルズ数データを用いた検証が必要なことを示唆している。

表1 計算格子数と計算粒子数の一覧

格子数	粒子数	計算機	参考
$512^3$	$1.7 \times 10^7$	ES2	Onishi et al. (2013)[6]
$1,000^3$	$1.3 \times 10^8$	ES2	Onishi et al. (2013)
$2,000^3$	$1.0 \times 10^9$	ES2	Onishi et al. (2013)
$4,000^3$	$1.6 \times 10^9$	K	Onishi&Seifert (2016)[5]
$6,000^3$	$5.4 \times 10^9$	K	Onishi & Seifert (2016)
$8,192^3$	$8.2 \times 10^9$	現行 ES	

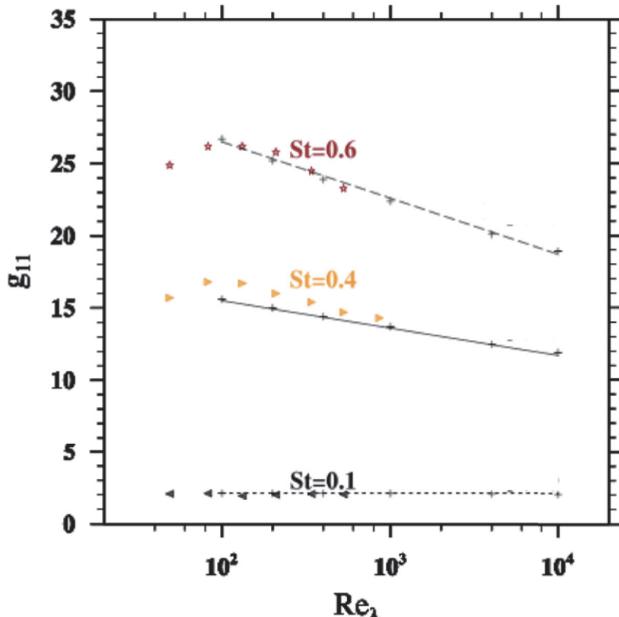


図3  $St < 1$  の慣性粒子同士の近接粒子分布関数のレイノルズ数依存性。線は間欠性理論(Onishi & Vassilicos 2014)に基づく予測値を表す。

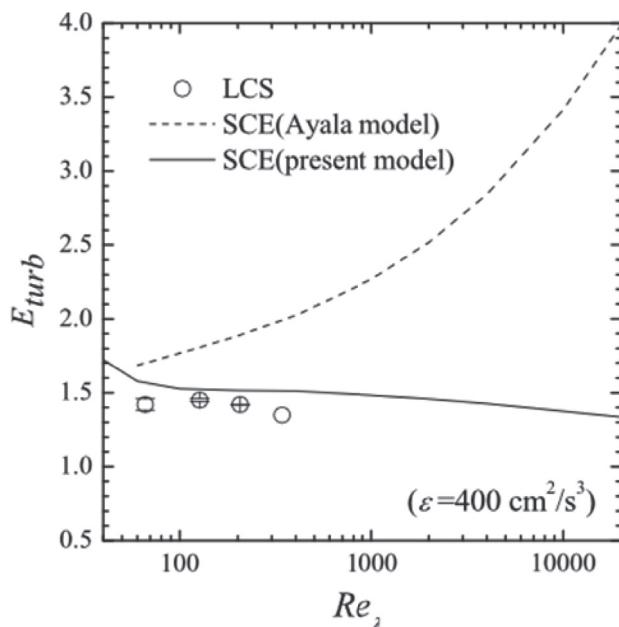


図4 雲乱流による autoconversion 項の増大率のレイノルズ数依存性。プロットは粒子成長をラグランジアン追跡法により直接計算した結果。本研究で開発したモデル結果(実線)がプロットとよく一致する。

## 文献

- [1] K. Matsuda, R. Onishi, R. Kurose and S. Komori, “Turbulence Effect on Cloud Radiation”, Physical Review Letters, 108, 224502 (2012).
- [2] K. Matsuda, R. Onishi and K. Takahashi, “Influence of gravitational settling on turbulent droplet clustering and radar reflectivity factor” Flow, Turbulence and Combustion, (2016) accepted.
- [3] R. Onishi, K. Matsuda and K. Takahashi, “Lagrangian Tracking Simulation of Droplet Growth in Turbulence–Turbulence Enhancement of Autoconversion Rate”, Journal of the Atmospheric Sciences, 72, 2591-2607 (2015).
- [4] R. Onishi and J.C. Vassilicos, “Collision statistics of inertial particles in two-dimensional homogeneous isotropic turbulence with an inverse cascade”, Journal of Fluid Mechanics, 745, 279-299 (2014).
- [5] R. Onishi and A. Seifert, “Reynolds-number dependence of turbulence enhancement on collision growth”, Atmos. Chem. Phys. Discuss., doi:10.5194/acp-2016-19 (2016).

# Numerical Study of Complex Turbulence Processes in Earth Science

## Project Representative

Ryo Onishi

Center for Earth Information Science and Technology, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

## Authors

Ryo Onishi

Center for Earth Information Science and Technology, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Keigo Matsuda

Center for Earth Information Science and Technology, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Koji Goto

NEC Corporation

We have performed direct numerical simulations (DNS) for inertial particles in homogeneous isotropic turbulence in order to clarify a part of the complex turbulent processes in Earth science. The DNS data has been used for the investigation of (i) the influence of turbulent clustering of cloud droplets on radar reflectivity and (ii) the influence of turbulent collisions on droplet growth in turbulent clouds. As for (i), it has been clarified that the settling of droplets would suppress the enhancement of radar reflectivity factor by turbulent clustering. The DNS for (ii) has provided turbulent collision statistics that can be the reference for collision model intercomparisons.

**Keywords:** turbulence, multi-scale simulation, multi-phase flow, Radar reflectivity

## 1. Influence of gravitational settling of cloud droplets on turbulent clustering and radar reflectivity factor

Cloud turbulence forms an inhomogeneous distribution of water droplets, often referred to as turbulent clustering or preferential concentration. The inhomogeneous distribution may affect radiations [1]. A direct numerical simulation (DNS) of particle-laden turbulence have been performed to observe

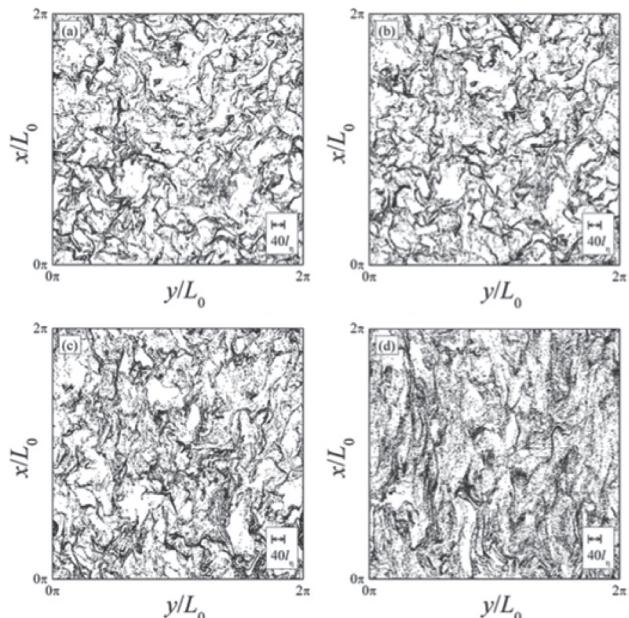


Fig. 1 Droplet distribution in x-y cross section for  $St=1$  at  $Re_\lambda=204$  (droplets in the range of  $0 < z < 4l_\eta$ , where  $l_\eta$  is the Kolmogorov scale); (a)  $S_v=0$ , (b)  $S_v=2.68$ , (c)  $S_v=6.79$ , and (d)  $S_v=19.3$ .

the nonuniform distribution of inertial particles in turbulence (turbulent clustering) under the presence of gravity [2]. Figure 1 shows the droplet distributions of  $St=1$  particles, where  $St$  is the Stokes number, obtained from the DNS. It is observed that the turbulent clusters become extended in vertical direction as the nondimensional terminal velocity  $S_v$  (the ratio of terminal velocity to the Kolmogorov velocity) increases. This study has estimated the influence of gravitational settling of cloud droplets on the radar reflectivity factor. Figure 2 shows the enhancement of radar reflectivity factor due to turbulent clustering for

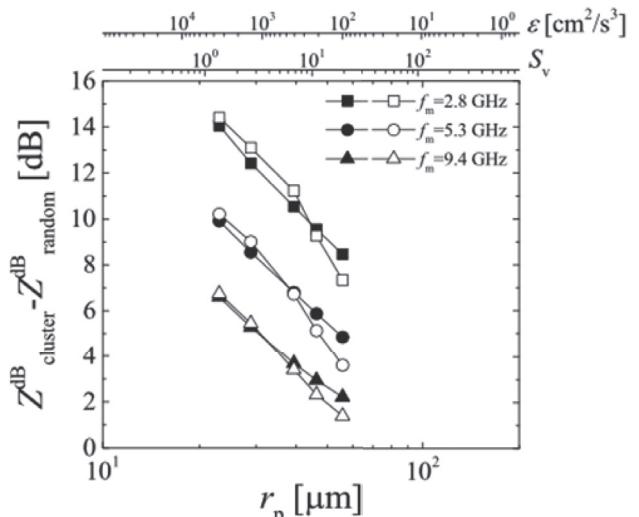


Fig. 2 Enhancement of radar reflectivity factor due to turbulent clustering, estimated under the condition where volume fraction is  $10^{-6}$ .

$St=1$ , where  $St$  is the Stokes number. For the large  $S_v$  cases, the enhancement of radar reflectivity factor is significantly suppressed by the settling of droplets. This finding can contribute to the improvement of radar observation technique.

## 2. Reynolds-number dependence of turbulence enhancement on collision growth

This study investigates the Reynolds-number dependence of turbulence enhancement on the collision growth of cloud droplets. The turbulent coagulation kernel proposed in Onishi et al. (2015)[3] (Onishi kernel) is updated by using the direct numerical simulation (DNS) results for large Taylor-microscale-based Reynolds numbers ( $Re_\lambda$ ). Table 1 shows the computational settings for the DNS. The DNS results for particles with a small Stokes number ( $St$ ) show a consistent Reynolds-number dependence of the so-called clustering effect with the locality theory proposed by Onishi and Vassilicos (2014) [4] (See Fig. 3). Stochastic collision-coalescence equation (SCE) simulations are conducted to investigate the turbulence enhancement on particle size evolutions. The SCE with the Ayala-Wang kernel (SCE-Ayala) and that with the present Onishi kernel (SCE-Onishi) are compared with results from the Lagrangian Cloud Simulator (LCS [3]), which tracks individual particle motions and size evolutions in homogeneous isotropic turbulence. Figure 4 shows the turbulence enhancement factors for particle size evolutions as a function of  $Re_\lambda$ . The SCE-Ayala and SCE-Onishi show consistent results with the LCS results for small  $Re_\lambda$ . The two SCE simulations, however, show different Reynolds-number dependences, indicating possible large differences in atmospheric turbulent clouds with large  $Re_\lambda$ [5]. This clearly suggests a strong demand for collision growth data with larger  $Re_\lambda$  to construct a more robust turbulent kernel.

Table 1 Computational settings and supercomputer platforms on which the simulation was performed.

number of grids	number of particles	supercomputer platform	reference
$512^3$	$1.7 \times 10^7$	ES2	Onishi et al. (2013) [6]
$1,000^3$	$1.3 \times 10^8$	ES2	Onishi et al. (2013)
$2,000^3$	$1.0 \times 10^9$	ES2	Onishi et al. (2013)
$4,000^3$	$1.6 \times 10^9$	K	Onishi & Seifert (2016) [5]
$6,000^3$	$5.4 \times 10^9$	K	Onishi & Seifert (2016)
$8,192^3$	$8.2 \times 10^9$	Present ES	

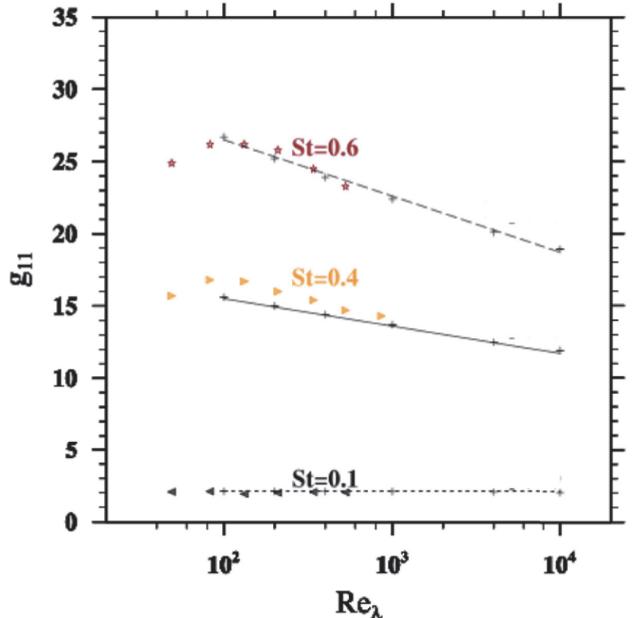


Fig. 3 Radial distribution function at the contact of monodisperse particles with  $St=0.1$ ,  $0.4$ , and  $0.6$  against  $Re_\lambda$ . The plotted symbols are the DNS results and the lines from the locality theory proposed by Onishi and Vassilicos (2014) [4].

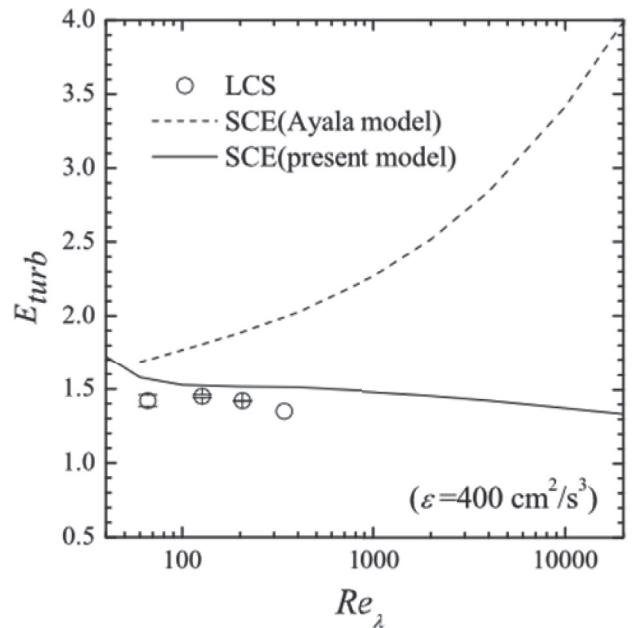


Fig. 4 Turbulence enhancement factors for particle size evolutions as a function of the Taylor-microscale-based Reynolds number  $Re_\lambda$ .

## References

- [1] K. Matsuda, R. Onishi, R. Kurose and S. Komori, “Turbulence Effect on Cloud Radiation”, Physical Review Letters, 108, 224502 (2012).
- [2] K. Matsuda, R. Onishi and K. Takahashi, “Influence of gravitational settling on turbulent droplet clustering and radar reflectivity factor” Flow, Turbulence and Combustion, (2016) accepted.
- [3] R. Onishi, K. Matsuda and K. Takahashi, “Lagrangian Tracking Simulation of Droplet Growth in Turbulence–Turbulence Enhancement of Autoconversion Rate”, Journal of the Atmospheric Sciences, 72, 2591-2607 (2015).
- [4] R. Onishi and J.C. Vassilicos, “Collision statistics of inertial particles in two-dimensional homogeneous isotropic turbulence with an inverse cascade”, Journal of Fluid Mechanics, 745, 279-299 (2014).
- [5] R. Onishi and A. Seifert, “Reynolds-number dependence of turbulence enhancement on collision growth”, Atmos. Chem. Phys. Discuss., doi:10.5194/acp-2016-19 (2016).