

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

松田 景吾

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

著者

松田 景吾^{*1}, 大西 領^{*1}, Dmitry Kolomenskiy^{*1}, 高垣 直尚^{*2}

^{*1} 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, ^{*2} 兵庫県立大学

様々な複雑乱流プロセスを解明することは、地球科学シミュレーションの信頼性向上につながるのみならず、ミクロスケールの海洋・大気現象の理解にもつながる極めて重要な研究課題である。そこで、本課題では、物理過程を精緻に取り扱った大規模数値計算を実施することにより各種の複雑乱流プロセスの解明とモデル化を行う。本年度は、雲乱流プロセスにおいて重要な役割を果たす雲粒の乱流クラスタリングについて、ラグランジアン雲シミュレータを用いて高レイノルズ数乱流中におけるクラスタリングデータを取得し、ウェーブレット解析を応用することによりマルチスケール構造の解析を行った。また、風波乱流プロセスについて、気液二相流の直接数値シミュレーションを実行することにより風波乱流場の発達機構に及ぼす表面張力の影響を明らかにした。

キーワード：乱流, 直接数値シミュレーション, 混相流, マルチスケール解析

1. 緒言

様々な複雑乱流プロセスを解明することは、地球科学シミュレーションの信頼性向上につながるのみならず、ミクロスケールの海洋・大気現象の理解にもつながる極めて重要な研究課題である。例えば、雲乱流プロセス、海洋表面の風波や波しぶきの形成プロセス、栄養塩・化学汚染物質の混合・反応プロセス等においては、乱流の影響を無視することはできない。これらの乱流プロセスについては、高レイノルズ数乱流計算に要する計算コストや混合・反応計算の困難さ等のために未解明の点が多く残されている。そのため、本課題では、乱流モデルを使わずにナビエ・ストークス方程式を計算する直接数値シミュレーション (Direct Numerical Simulation, DNS) 法による大規模シミュレーションを実施することにより、混相乱流現象や乱流混合・反応現象のメカニズムを解明し、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している。本年度は、ラグランジアン雲シミュレータによる乱流中における雲粒のクラスタリングのマルチスケール統計解析、および風波乱流場の発達機構の解明に取り組んだ。

2. ラグランジアン雲モデルを用いた雲乱流プロセスの解明

雲の中では多数の雲粒が高レイノルズ数乱流中を漂っている。雲粒のような慣性粒子は遠心力によって乱流渦からはじき出されるため、乱流中では非一様な空間分布を示す。これを乱流クラスタリングと呼ぶ。雲粒の乱流クラスタリングは、雲粒が雨粒に成長する過程での乱流衝突併合を促進する効果があるほか、雲のレーダー反射因子を増強させる効果も指摘されている [1, 2, 3]。これまで数値計算や室内実験によって乱流クラスタリングの空間

構造や形成プロセスが調べられてきてはいるが、対流雲のような高レイノルズ数乱流中での乱流クラスタリング機構については十分に明らかになってない。そこで本研究では、一様等方性乱流の DNS を行い、得られた粒子分布データに対してウェーブレット解析を適用することにより、高レイノルズ数乱流中での乱流クラスタリングのマルチスケール構造を明らかにすることを目的とした。

本研究では、これまでに雲粒の乱流衝突成長プロセス等を明らかにするために開発を進めてきた Lagrangian Cloud Simulator (LCS) を用いた。LCS では、DNS に基づいて乱流場を計算すると同時に、多数の雲粒の個々の運動をラグランジアン的に追跡する [1, 2, 3]。立方体の計算領域を設定し、全方向に周期境界条件を設定した。格子点数を $512^3 \sim 2048^3$ に設定することにより、テイラーマイクロスケール基準レイノルズ数 $Re_\lambda = 204 \sim 531$ の高レイノルズ数乱流場を対象として LCS を実行し、最大 10 億個のラグランジアン慣性粒子を同時に追跡することで、ランダム性ノイズの影響の小さい粒子分布データを取得した。この粒子分布データに基づいて算出した数密度場に対して、ウェーブレット解析に基づいたスケール分解を行った [4]。図 1 に、粒子の慣性力の大きさを表すストークス数 St が 1 の場合の、粒子分布データに基づく数密度場 n とウェーブレット解析によりスケール分解された数密度変動場 n_j を示す。ウェーブレット解析では、スケール $l_j = 2^{-j}$ ($j = 0, 1, \dots, J-1$) の直交ウェーブレットを用いた。ウェーブレット変換を施した後、スケール l_j ごとに逆ウェーブレット変換を施し、実空間上の数密度変動場 n_j を算出した。数密度変動場 n_j のうち、スケール 2^{-2} , 2^{-4} , および 2^{-8} の数密度変動場 n_j を図示した。図より、スケールが小さくなると、総数密度 n が大きいクラスタ領域周辺での数密度変動が卓越することが確認できる。

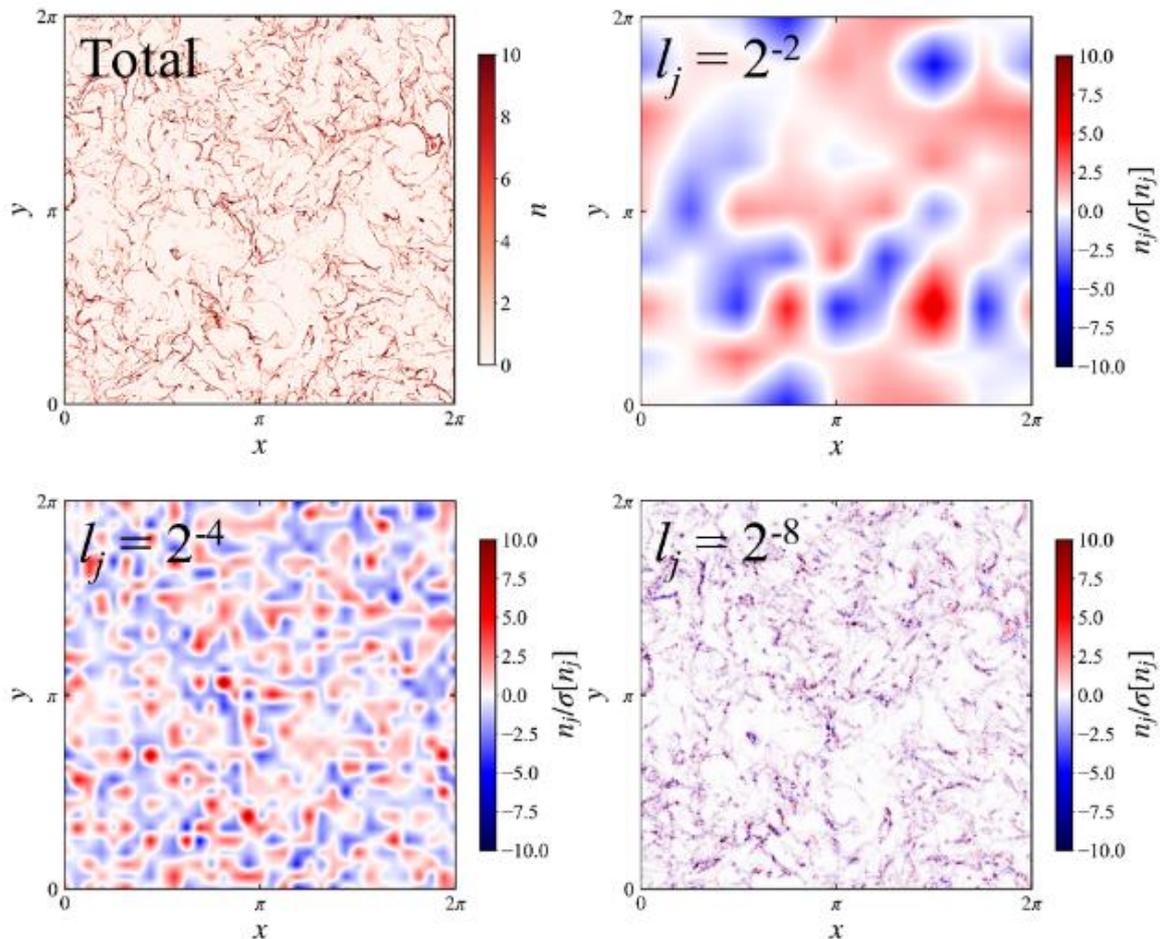


図1 ウェーブレット解析による粒子数密度分布のスケール分解 ($St = 1$)。 (左上) 総数密度分布 n , (右上, 左下, 右下) スケール分解後の数密度変動場 n_j [4]。 l_j はウェーブレットのスケールを表す。

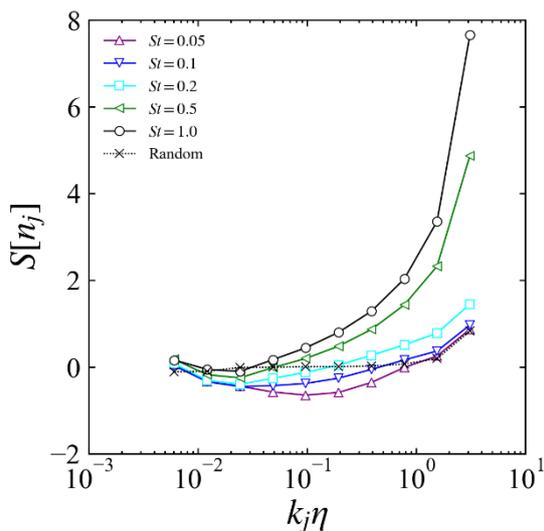


図2 ストークス数 $St \leq 1$ の場合のスケール依存歪度因子 $S[n_j]$ [4]。 横軸はコルモゴロフスケール η で無次元化された波数 k_j 。

ストークス数 St が異なる複数のケースについて、スケールごとに数密度変動 n_j の統計量を調べた。図2および3にそれぞれスケール依存歪度因子 $S[n_j]$ およびスケール依存尖度因子 $F[n_j]$ を示す。 St が1程度の場合にはスケールが小さくなるほど歪度因子 $S[n_j]$ が正の大きな値を示し、尖度因子 $F[n_j]$ も大きく増加する傾向が見られた。これは、小スケールではクラスターが空隙よりも卓越し、間欠的に存在していることを示している。一方で、 St が0.2程度以下の場合には、コルモゴロフスケールよりも大きなスケール ($0.02 \leq k_j \eta \leq 0.4$) において歪度因子 $S[n_j]$ が負値を示した。また同程度のスケールにおいて、ストークス数 St が小さくなるほど尖度因子 $F[n_j]$ が大きくなる傾向が見られた。これらの傾向から、ストークス数が小さい場合には、空隙がクラスターよりも卓越しながら間欠的に分布していることが明らかになった。さらに、 $Re_\lambda \geq 300$ ではストークス数が1の場合にも大スケールにおいて歪度因子 $S[n_j]$ が負値を示すことが明らかになった。これらの結果は、空隙がクラスタリング形成機構において重要な役割を果たしていることを示唆している。

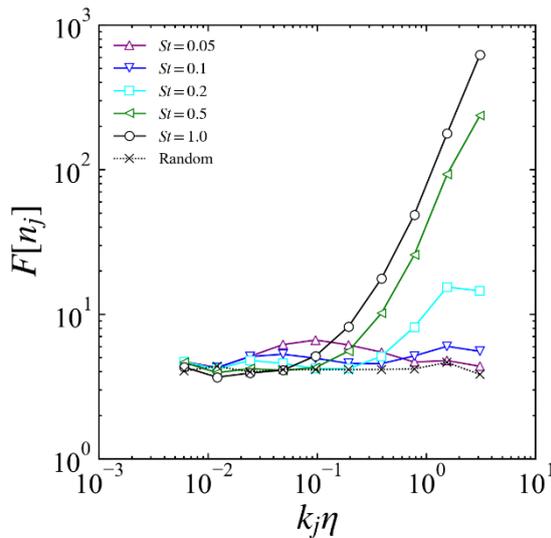


図3 ストークス数 $St \leq 1$ の場合の数密度のスケール依存尖度因子 $F[n_j]$ [4]. 横軸はコルモゴロフスケール η で無次元化された波数 k_j .

本解析を用いることで、乱流クラスタリングのマルチスケール構造をその形成メカニズムに基づいてモデル化でき、高レイノルズ数の雲乱流中における雲粒のクラスタリングを適切にモデル化することが可能となる。なお、乱流中における慣性粒子のクラスタリングは、雲乱流だけでなく、海洋学、工学、および宇宙物理学分野などにおいても重要な現象であり、本成果は様々な分野に見られる乱流クラスタリングの普遍的な理解に繋がる重要な進展である。

3. 風波乱流場の直接数値計算手法の開発および風波気液界面を通した熱・運動量移動機構の解明

海洋上に吹く風により海洋表面に風波が発生する。この風波界面近傍の乱流場や波頭から飛散する波しぶきが、大気海洋間での熱や水蒸気の交換を促進する可能性が議論されている。本研究では、気液二相流のDNSにより、風波気液界面近傍の乱流場や波しぶきの形成過程を明らかにすることを目的とする。今年度は、風波気液界面の成長機構に及ぼす表面張力の影響について解析を行った[5].

主流方向に十分に長い計算領域 ($20 \text{ cm} \times 3.84 \text{ cm} \times 3.75 \text{ cm}$) を設定し、主流方向とスパン方向には周期境界条件を設定した。気側の初期流動場として、十分に発達した壁面乱流場 (上端風速がおおよそ 5 m/s) を与えた一方、液側の初期流動場については静止状態とし、初期界面変位も 0 とした。主流方向に一定の速度勾配を気側に与え、重力表面張力波の状態の 7 秒間の風波の発達のDNSを実施した。

表面張力を水の値にした場合と水の半分の値にした場合とで比較した結果、表面張力を小さくした場合の方が波高の成長速度が増加することが明らかになった。そこで、風波の成長機構に及ぼす表面張力の影響を明らかに

するために、波高スペクトルを比較した。図4に、風波が発達した $4.0 \text{ s} < t \leq 7.0 \text{ s}$ で時間平均した主流方向の1次元波高スペクトル $S_{\eta\eta}(k)$ を示す。スペクトルのピーク波数は、 $4.0 \text{ s} < t \leq 7.0 \text{ s}$ で時間平均した有義波長 \bar{L}_s に対応する波数 $k_s = 2\pi/\bar{L}_s$ と一致する。重力表面張力波では、波長の長い波と等しい位相速度を持つリップル状の表面張力波が高調波共鳴作用によって形成される[6]。これは、有義波が風から受け取ったエネルギーの一部が、高調波共鳴によって高波数の波へ輸送されることを意味する。波数 k_s の波と共鳴する (i. e., 位相速度が等しい) 表面張力波の波数 k_c は、非線形性が弱い場合には $k_c = (\rho_w g / \sigma) k_s$ によって与えられる。図より、 $\sigma = 1.0\sigma_w$ の場合、高波数側のスペクトルは波数 k_c まで緩やかなスロープを示し、 k_c 付近より高波数では急激に強度が低下することが確認できる。 $\sigma = 0.5\sigma_w$ の場合には、風波がより発達しているため k_s 周辺のピークが $\sigma = 1.0\sigma_w$ の場合より大きい。一方、高波数側では、表面張力の低下によって有義波と共鳴する表面張力波の波数 k_c が大きくなるため、 $\sigma = 1.0\sigma_w$ での k_c (黒) 周辺の強度が低下し、 $\sigma = 0.5\sigma_w$ での k_c (赤) 周辺の強度が増加している。ただし、 $\sigma = 0.5\sigma_w$ での k_c 付近での強度は、 $\sigma = 1.0\sigma_w$ での k_c 付近での強度よりも顕著に小さい。

これらの結果は、表面張力の低下によって、有義波から表面張力波へのエネルギー輸送が抑制されていることを示している。したがって、表面張力の低下による有義波の成長速度の増加は、表面張力波へのエネルギー輸送の抑制によって有義波がより多くのエネルギーを蓄積するようになることに起因することが明らかとなった。

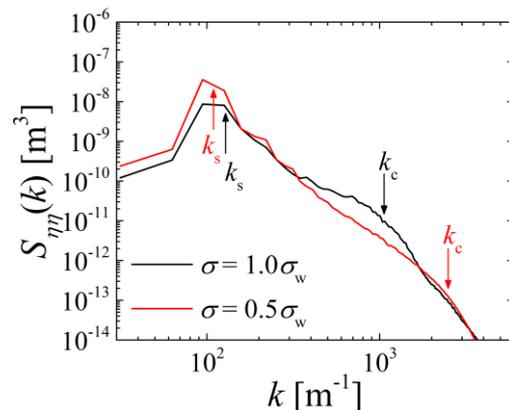


図4 風波の1次元波高スペクトル $S_{\eta\eta}(k)$ [5]. 表面張力 σ が水の値の場合 ($\sigma = 1.0\sigma_w$) とその半分の値の場合 ($\sigma = 0.5\sigma_w$) を比較。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費若手研究 (B) JP17K14598 および挑戦的研究 (萌芽) JP19K21937 の助成を受けた。

文献

- [1] R. Onishi, K. Matsuda, and K. Takahashi, “Lagrangian Tracking Simulation of Droplet Growth in Turbulence – Turbulence Enhancement of Autoconversion Rate”, *J. Atmos. Sci.*, 72, pp. 2591-2607 (2015).
- [2] Y. Kunishima and R. Onishi, “Direct Lagrangian tracking simulation of droplet growth in vertically developing cloud”, *Atmos. Chem. Phys.* 18, pp. 16619-16630 (2018).
- [3] K. Matsuda and R. Onishi, “Turbulent enhancement of radar reflectivity factor for polydisperse cloud droplets”, *Atmos. Chem. Phys.*, 19, pp.1785-1799 (2019).
- [4] K. Matsuda, K. Schneider, and K. Yoshimatsu, “Scale-dependent statistics of inertial particle distribution in high Reynolds number turbulence”, *arXiv:2007.09400* (2020).
- [5] K. Matsuda, S. Komori, N. Takagaki, and R. Onishi, “Effects of surface tension reduction on wind-wave growth and air-water scalar transfer”, *J. Fluid Mech.*, under review.
- [6] A. V. Fedorov, W. K. Melville, and A. Rozenberg, “An experimental and numerical study of parasitic capillary waves”, *Phys. Fluids*, 10, pp.1315-1323 (1998).

Numerical Study of Complex Turbulence Processes in Earth Science

Project Representative

Keigo Matsuda

Research Institute for Value-Added-Information Generation, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Authors

Keigo Matsuda^{*1}, Ryo Onishi^{*1}, Dmitry Kolomenskiy^{*1}, and Naohisa Takagaki^{*2}

^{*1} Center for Earth Information Science, Research Institute for Value-Added-Information Generation, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology,

^{*2} University of Hyogo

Importance of micro-scale turbulence processes is increasing as the resolution of Earth-science simulation models becomes higher. Thus, this project performs direct numerical simulations (DNS) for multiphase turbulent flows to clarify a part of the complex turbulent processes in Earth science. The main achievements are as follows: (i) Wavelet analyses are applied to clarify the multiscale structure of inertial particle clustering which has significant influence on the cloud turbulence process at high Reynolds number; (ii) The growth mechanism of wind waves on the air-water interface is investigated by using DNS of air-water two-phase turbulent flow, and the contribution of surface tension to the wave growth is clarified.

Keywords : turbulence, direct numerical simulation, multiphase flow, multiscale analyses

1. Introduction

Various complex turbulent processes play important roles in Earth-science simulations. Understanding of the processes will improve the reliability of such simulations and lead to a better understanding of ocean and atmospheric phenomena. Many aspects of the turbulence processes remain unexplored due to the computational cost for high Reynolds number turbulence and the difficulty of accurate computation for mixing and reaction. The aim of this project is to investigate the mechanisms of multiphase turbulence phenomena and develop new parameterizations, performing direct numerical simulation (DNS). In this fiscal year, we have investigated the multiscale statistics of cloud droplet clustering in turbulent flow using the Lagrangian Cloud Simulator (LCS) and the wind-wave growth mechanism using an air-water two-phase turbulent flow simulator.

2. Inertial particle clustering in cloud turbulence

Cloud droplets are suspended in high Reynolds number turbulence. Inertial particles such as cloud droplets are swept out from turbulent vortices by centrifugal force and show a non-uniform spatial distribution. This phenomenon is referred to as turbulent clustering. Turbulent clustering enhances turbulent collision and coalescence in the raindrop formation process [1,2]. It is also suggested that turbulent clustering enhances the cloud radar reflectivity factor [3]. The structure and formation process of turbulent clustering have been investigated numerically and experimentally, but the turbulent clustering mechanism at high Reynolds number has not been sufficiently clarified. In this study, DNS of turbulence have been performed and wavelet analysis has been applied to the obtained particle distribution data to elucidate the multi-scale structure of turbulent clustering in high Reynolds number turbulence.

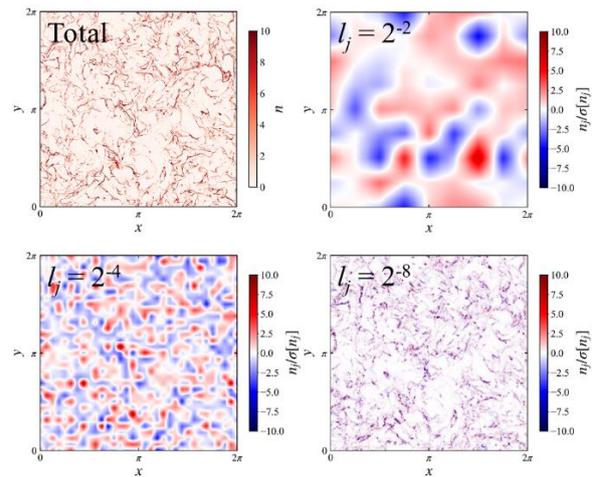


Fig. 1 Total number density field n (top left) and scale contributions n_j obtained by the wavelet analysis for the scale $l_j = 2^{-2}$ (top right), 2^{-4} (bottom left), and 2^{-8} (bottom right) [4].

The LCS has been used to compute homogeneous isotropic turbulence and track the individual motions of inertial particles in a Lagrangian manner [1,2,3]. A cubic computational domain with periodic boundary conditions is used. The number of grid points were $512^3 - 2048^3$ so that the Taylor-microscale-based Reynolds number became $Re_\lambda = 204 - 531$. A maximum of one billion Lagrangian inertial particles are tracked simultaneously. A scale decomposition based on wavelet analysis was applied to the number density field of the inertial particles [4]. Figure 1 shows the number density field n for the Stokes number $St = 1$ and the scale contributions n_j obtained by the wavelet analysis.

We examined the scale-dependent skewness and flatness factors, $S[n_j]$ and $F[n_j]$, for several Stokes numbers St , as shown in Fig. 2. For $St \approx 1$, as the scale becomes smaller, $S[n_j]$ shows large positive values and $F[n_j]$ increases. This indicates that clusters are more pronounced and intermittently distributed at small scales. On the other hand, for $St \lesssim 0.2$, $S[n_j]$ is negative at intermediate scales, which are larger than the Kolmogorov scale η . It is also found that $F[n_j]$ becomes larger as St decreases in that scale range. These trends indicate that for small Stokes numbers, voids are more pronounced and intermittently distributed. We also found that for $Re_\lambda \gtrsim 300$, $S[n_j]$ is negative at larger scales when the Stokes number is 1. This suggests that voids play an important role in the clustering structure formation.

These results would contribute to appropriate modelling of the multiscale turbulent clustering structure in high Reynolds number cloud turbulence based on the clustering formation mechanism.

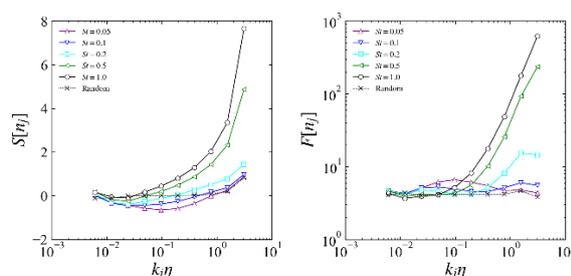


Fig. 2 Scale-dependent skewness factor $S[n_j]$ (left) and flatness factor $F[n_j]$ (right) for $St \leq 1$ [4]. The horizontal axes are the wavenumber k_j normalized by the Kolmogorov scale η .

3. Surface tension effect on wind-wave growth mechanism

Wind waves and sea spray enhance the heat and water vapor exchange between the atmosphere and ocean. In this fiscal year, the effect of surface tension on the wind-wave growth mechanism has been investigated using the DNS of air-water two-phase turbulent flow [5]. The computational domain was set to $20 \text{ cm} \times 3.84 \text{ cm} \times 3.75 \text{ cm}$, and periodic boundary conditions were set in the streamwise and spanwise direction. A well-developed wall turbulence was imposed initially in the air side, while the initial flow field in the water side was static and the initial interface was flat. The development of wind waves for 7 seconds was calculated.

A comparison between the case of the water surface tension and the case of half the water value shows that the wave growth is faster for the smaller surface tension case. Thus, the wave height spectra were compared to clarify the effect of surface tension on the wave growth mechanism. Figure 3 shows the time-averaged one-dimensional wave height spectrum $S_{\eta\eta}(k)$. For gravity-capillary waves, wave energy is transferred from the

significant waves to capillary waves by harmonic resonance [6]. The results show that, when the surface tension is reduced, the energy transfer from the significant waves to the resonant capillary waves is suppressed, and then the significant waves accumulate more energy. This causes the increase in the wave growth rate due to the surface tension reduction.

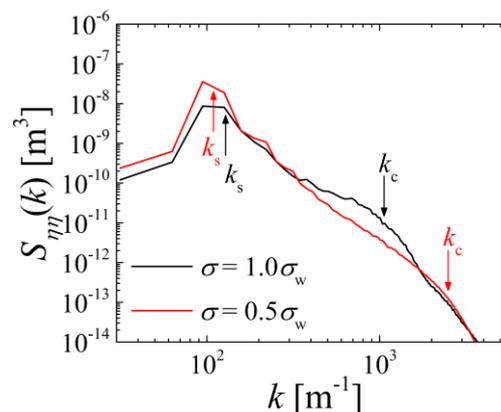


Figure 3 Wave height spectra $S_{\eta\eta}(k)$ for the case of the water surface tension ($\sigma = 1.0\sigma_w$) and the case of half the water value ($\sigma = 0.5\sigma_w$) [5].

Acknowledgement

These studies are supported by JSPS KAKENHI No. JP17K14598 and No. JP19K21937.

References

- [1] R. Onishi, K. Matsuda, and K. Takahashi, "Lagrangian Tracking Simulation of Droplet Growth in Turbulence - Turbulence Enhancement of Autoconversion Rate", *J. Atmos. Sci.*, 72, pp. 2591-2607 (2015).
- [2] Y. Kunishima and R. Onishi, "Direct Lagrangian tracking simulation of droplet growth in vertically developing cloud", *Atmos. Chem. Phys.* 18, pp. 16619-16630 (2018).
- [3] K. Matsuda and R. Onishi, "Turbulent enhancement of radar reflectivity factor for polydisperse cloud droplets", *Atmos. Chem. Phys.*, 19, pp.1785-1799 (2019).
- [4] K. Matsuda, K. Schneider, and K. Yoshimatsu, "Scale-dependent statistics of inertial particle distribution in high Reynolds number turbulence", arXiv:2007.09400 (2020).
- [5] K. Matsuda, S. Komori, N. Takagaki, and R. Onishi, "Effects of surface tension reduction on wind-wave growth and air-water scalar transfer", *J. Fluid Mech.*, under review.
- [6] A. V. Fedorov, W. K. Melville, and A. Rozenberg, "An experimental and numerical study of parasitic capillary waves", *Phys. Fluids*, 10, pp.1315-1323 (1998).