

# 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 地球情報基盤センター

著者

松田 景吾<sup>\*1</sup>, 大西 領<sup>\*1</sup>, 測上 弘光<sup>\*2</sup>, 伊藤 靖仁<sup>\*3</sup>, 岩野 耕治<sup>\*3</sup>,  
酒井 康彦<sup>\*3</sup>, 高牟礼 光太郎<sup>\*3</sup>, 長田 孝二<sup>\*3</sup>, 渡邊 智昭<sup>\*3</sup>, 金子 圭佑<sup>\*4</sup>,  
黒瀬 良一<sup>\*4</sup>, 高垣 直尚<sup>\*5</sup>

\*1 海洋研究開発機構 地球情報基盤センター, \*2 NEC ソリューションイノベータ株式会社, \*3 名古屋大学, \*4 京都大学, \*5 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、ミクروسケールの海洋・大気現象の理解につながるのみならず、高解像度かつ高精度の地球科学シミュレーションの実現に不可欠な、極めて重要な研究課題である。例えば、雲粒・雨滴の成長過程や対流雲のレーダー反射強度、海洋表面の風波や波しぶきの形成過程、栄養塩・化学汚染物質の混合・反応過程等においては、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。そこで、本研究課題では、大規模直接数値計算 (Direct Numerical Simulation, DNS) 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する。本年度は、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、風波乱流場の発達および波しぶきの形成過程を明らかにするための DNS コードを開発すること、安定密度成層下における乱流塊の空間発展機構および乱流遷移域のせん断混合層における運動量輸送現象を明らかに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, 乱流・非乱流界面

## 1. 積雲乱流中に分散する雲粒の乱流クラスタリングによるレーダー反射因子の増強効果

乱流中において雲粒はクラスタを形成 (乱流クラスタリング) し、それによって雲のレーダー反射因子が顕著に増加する可能性があることが、単一粒径の雲粒を対象とした既往研究により指摘されている [1, 2]。しかし、実際の雲における影響を明らかにするためには、雲粒の粒径分布を考慮することが必要である。そこで、複数粒径の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、乱流の直接数値シミュレーション (direct numerical simulation, DNS) により、定量的に明らかにした。図 1 に示すように、サイズの異なる粒子の乱流クラスタには空間

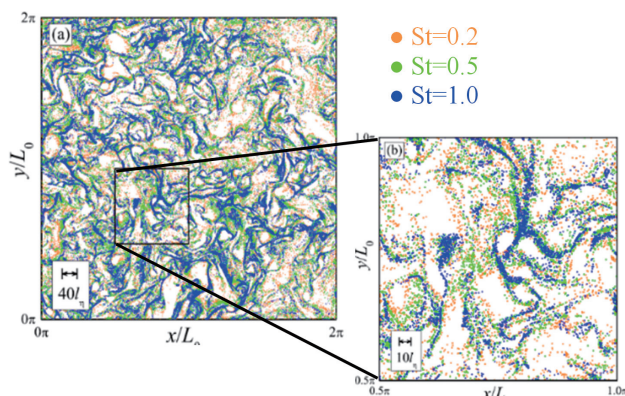


図 1 DNS により得られた 3 種類のサイズの粒子の乱流クラスタリング。

的な相関がある。このようなクラスタの空間的相関特性についてマルチスケール性を考慮してモデル化を行い、雲粒の粒径分布を考慮して、乱流によるレーダー反射因子の増加量を推定するモデルを確立した。このモデルを現実的な積雲を模した高解像度雲シミュレーション結果 (Onishi & Takahashi, 2012 [3]) に適用し、乱流クラスタリングにより引き起こされるレーダー観測誤差を見積もった。図 2

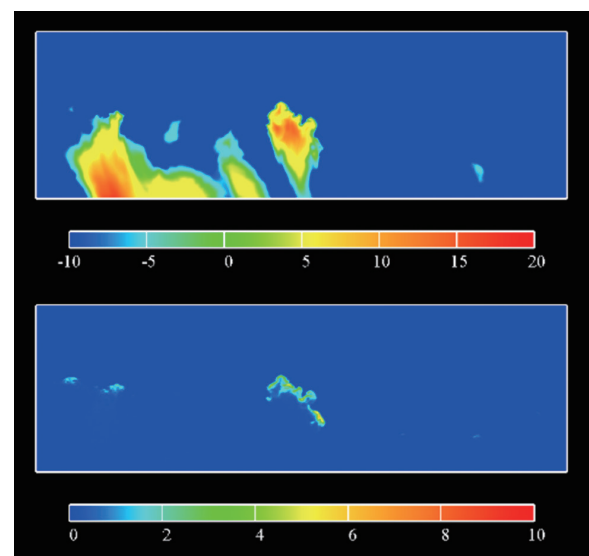


図 2 高解像度雲シミュレーションデータにおけるレーダー反射因子の増加量。(上)Sバンドでのレーダー反射因子分布、(下)乱流クラスタリングによるレーダー反射因子の増加量。

にレーダー反射因子モデルにより推定された、積雲のレーダー反射因子と、乱流クラスタリングに起因する増加量を示す。これらの結果から、現実的な積雲を対象としたレーダー観測において、乱流クラスタリングが顕著な観測誤差の要因になりうることを明らかにした。本成果は、レーダー観測の精度向上に資するほか、ゲリラ豪雨などの早期アラートシステムの実現につながると期待される。

## 2. 風波乱流場における風波の発達および波しぶき形成機構

海洋上を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風波の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し、台風等の気象現象に影響を及ぼす可能性が議論されている。このような効果を明らかにするためには、風波乱流場やそこから飛散する波しぶきが、大気海洋間の熱および水蒸気の交換量に及ぼす影響を定量的に明らかにするだけでなく、風波や波しぶきの形成メカニズムの理解に基づいて飛散モデルを構築することが極めて重要である。そのため、本研究では、京都大学と共同で気液二相流の直接数値シミュレーション (DNS) コードを開発し、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、気液二相流の DNS [4, 5] を地球シミュレータ上で実

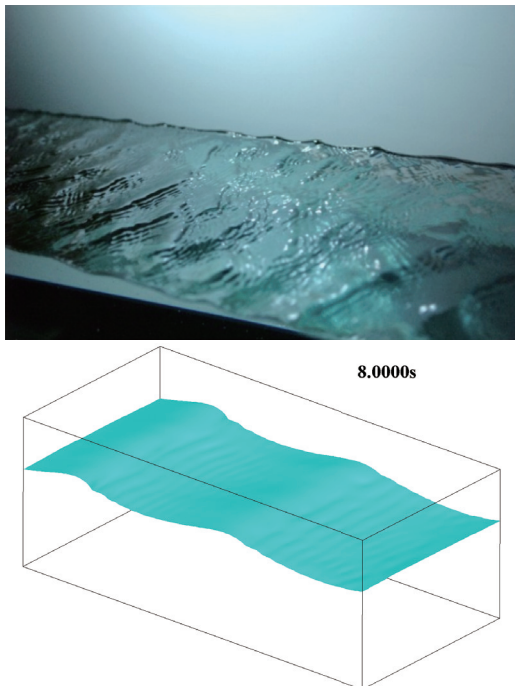


図3 低風速時（風速 5m/s）における風波の発達の様子。(上) 風洞水槽実験による風波、(下) DNS による風波。

行した。その結果、低風速時の風波について実験との比較により計算精度を確認した。図3に示すように、室内実験で撮影された風波界面形状（画像提供：高垣直尚博士、小森 悟教授）には、波頭の下流側のリップルが存在しており、DNSにより得られた風波界面形状にも同様にリップルが形成されていることが確認できる。一方、京都大学では微粒化過程について精度よくシミュレーションすることに成功した。今後、これらの技術を合わせ、高速化チューニングおよび大規模並列計算のための改良を行い、高風速時の波しぶき形成過程の解明に取り組む。

## 3. 安定密度成層下における乱流塊の空間発展機構

安定密度成層下における局所的な乱流塊の生成は大気境界層や海中混合層など地球環境のいたるところで見られ、その空間的な発展の予測・モデル化が、大気や海洋の運動メカニズムを明らかにするうえで重要な課題となっている。こうした乱流塊は外部の層流（あるいは弱い乱流）と薄い層状の領域によって分けられており、この層を介してエネルギーや熱・物質の輸送が行われる。この層は乱流・非乱流界面と呼ばれ、その特性が乱流場の空間発展においても重要な役割を果たすと考えられている。本研究では安定密度成層下に発達する乱流塊の直接数値シミュレーション (DNS) を用いて、安定密度成層下における乱流塊の空間発展と乱流・非乱流界面の関連を調べた。図4に乱流混合層中の乱流・非乱流界面近傍の渦度場と拡散物質濃度の可視化結果を示す。図に示された界面近傍の渦構造の周りに、外部から取り込まれつつある流体が存在していることが確認できる。このような乱流外部から取り込まれる流体体積を追跡し、その変形や界面層を通過する流体速度の特性を調べた結果、図4に見られるような界面近傍の渦構造が外部流体の取り込みにおいて重要な役割を果たしていることが明らかとなった [6]。また、安定密度成層下において、界面形状が浮力の効果によって大きく変化し（図5）、それとともに外部流体の取り込み量が大きく低下することが明らかとなった [7]。本研究成果が環境中に現れる局所

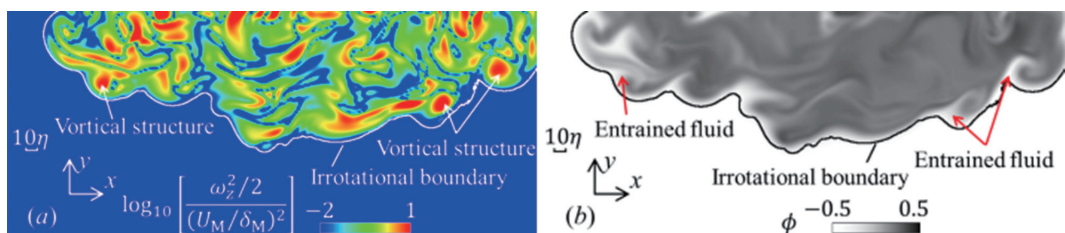


図4 (a) DNSにより得られた乱流・非乱流界面近傍 (irrotational boundary) の渦構造 (b) 乱流内部へ取り込まれる外部流体 (白色)。

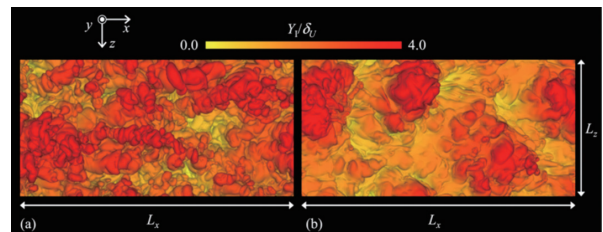


図5 乱流塊外縁 (乱流・非乱流界面) 可視化 (乱流中心からの界面の高さで色付け) (a) 密度一定の場合 (b) 安定密度成層。

的な乱流の空間発展の予測手法の発展に大きく貢献することが期待される。

#### 4. 乱流遷移域のせん断混合層における運動量輸送現象の解明

自由せん断乱流は大気中、海洋中など様々な場面で見られ、その流動構造やそれに伴うスカラ輸送機構を解明することが重要な課題となっている。自由せん断乱流の一つであるせん断混合層は、通常層流状態から乱流状態に遷移するが、その過程には未解明な点もある。その中の一つに、初期乱流混合層において運動量が一部逆勾配方向に輸送される現象がある。そこで本研究では、この輸送メカニズムを直接数値計算 (DNS) により明らかにした。DNS は層流から乱流に空間的に発達する場に対して行われた。運動量の逆勾配輸送を示す領域が存在することを確認後、運動量輸送方程式の各項を評価し、その駆動力を明らかにした。その結果、図6に示すように、混合層外縁部では圧力拡散項が、混合層中心部では圧力歪相関項の  $-p(\partial u/\partial y)$  が逆勾配輸送に寄与することを明らかにした [8]。さらに、乱流非乱流解析およびその可視化 (図7) から、逆勾配方向の運動量輸送は非乱流領域のみに局所的に生じる挙動ではな

く、乱流領域においても生じることを明らかにした。これらの結果は、低レイノルズ数流れや発達初期における乱流構造を、完全発達した場に対する乱流モデルによりシミュレーションすることは、大きな誤差を生む可能性があることを示唆している。

#### 文献

- [1] K. Matsuda, R. Onishi, M. Hirahara, R. Kurose, K. Takahashi, and S. Komori, “Influence of microscale turbulent droplet clustering on radar cloud observations,” *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 71, pp. 3569-3582 (2014).
- [2] K. Matsuda, R. Onishi, and K. Takahashi, “Influence of gravitational settling on turbulent droplet clustering and radar reflectivity factor,” *Flow, Turbulence and Combustion*, Vol. 98, pp. 327-340 (2017).
- [3] R. Onishi and K. Takahashi, “A Warm-Bin – Cold-Bulk Cloud Microphysics Model,” *Journal of the Atmospheric Science*, Vol. 69, pp. 1474-1497 (2012).
- [4] R. Kurose, N. Takagaki, A. Kimura, and S. Komori, “Direct numerical simulation of turbulent heat transfer across a sheared wind-driven gas-liquid interface,” *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 804, pp. 646-687 (2016).
- [5] N. Takagaki, R. Kurose, A. Kimura, and S. Komori, “Effect of Schmidt number on mass transfer across a sheared gas-liquid interface in a wind-driven turbulence,” *Scientific Reports*, 6:37059 (2016).
- [6] T. Watanabe, C. da Silva, and K. Nagata, “Multi-particle dispersion during entrainment in turbulent free-shear flows,” *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 805, pp. 1-12 (2016).
- [7] T. Watanabe, J. Riley, and K. Nagata, “Effects of stable stratification on turbulent/non-turbulent interfaces in turbulent mixing layers,” *Physical Review Fluids*, Vol. 1, 044301 (2016).
- [8] K. Takamura, Y. Ito, Y. Sakai, K. Iwano, and T. Hayase, “Direct Numerical Simulation of Momentum and Mass Transfer in a Spatially Developing Mixing Layer,” *Proc. International Conference on Flow Dynamics 2016*, venue, Japan (2016).

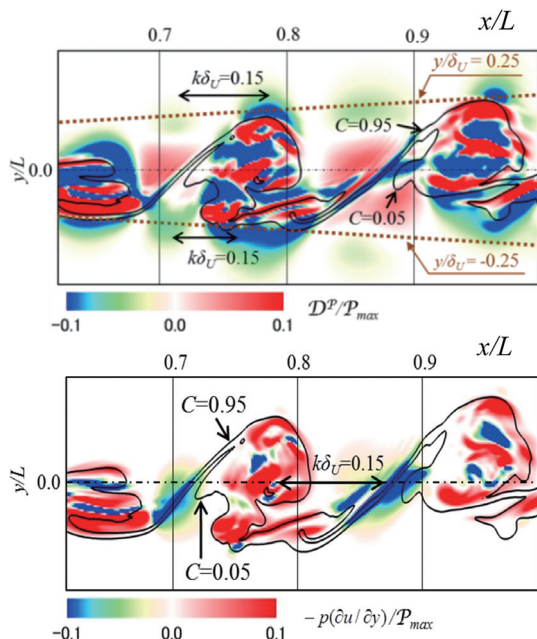


図6 逆勾配方向の運動量輸送に寄与する項の可視化。(上) 圧力拡散項 (下) 圧力歪相関項  $-p(\partial u/\partial y)$ 。負の値 (青色) は逆勾配方向の運動量輸送を示す。

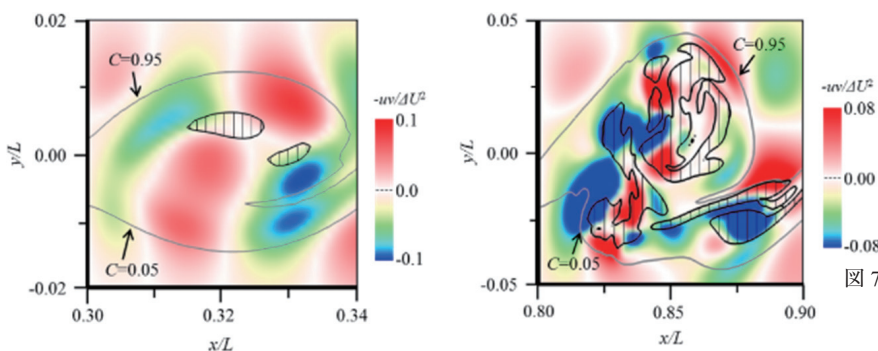


図7 ある瞬間における  $-uv/\Delta U^2$  と乱流領域の分布。(左図) 上流部、(右図) 中流部。縦線は乱流領域、C はスカラを示す。

# Numerical Study of Complex Turbulence Processes in Earth Science

Project Representative

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

Authors

Keigo Matsuda<sup>\*1</sup>, Ryo Onishi<sup>\*1</sup>, Hiromitsu Fuchigami<sup>\*2</sup>, Yasumasa Ito<sup>\*3</sup>, Koji Iwano<sup>\*3</sup>, Yasuhiko Sakai<sup>\*3</sup>, Kotaro Takamure<sup>\*3</sup>, Koji Nagata<sup>\*3</sup>, Tomoaki Watanabe<sup>\*3</sup>, Keisuke Kaneko<sup>\*4</sup>, Ryoichi Kurose<sup>\*4</sup> and Naohisa Takagaki<sup>\*5</sup>

\*1 Center for Earth Information Science and Technology, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, \*2 NEC Solution Innovators, Ltd., \*3 Nagoya University, \*4 Kyoto University, \*5 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 in order to clarify a part of the complex turbulent processes in Earth science. The main achievements are as follows: (i) The influence of turbulent clustering of polydispersed cloud droplets on radar reflectivity factor is investigated and modeled; (ii) a DNS code for air-water two-phase flow is developed in order to investigate the development of wind wave turbulence and sea spray generation; (iii) the mechanisms of fluid entrainment through turbulent/nonturbulent interface is investigated by using the DNS for spatially developing turbulent patches under stably stratified conditions and a mixing model for heat and mass through the interface layer is developed; (iv) the momentum transfer mechanism in shear mixing layer is investigated and the driving force of the inverse gradient momentum transfer is clarified.

**Keywords:** turbulence, multi-scale simulation, multi-phase flow, radar reflectivity factor, turbulent/nonturbulent interface

## 1. Enhancement of radar reflectivity factor due to turbulent droplet clustering in cumuli

Cloud droplets disperse nonuniformly in turbulence. This phenomenon is referred to as turbulent clustering. Recent studies revealed that turbulent clustering of monodispersed droplets can increase the radar reflectivity factor of convective clouds [1, 2]. For evaluating the influence of turbulent clustering on actual radar cloud observations, it is necessary to consider droplet size distributions. Thus, this study has investigated the quantitative influence of the droplet size distribution on the radar reflectivity factor enhancement using the three-dimensional direct numerical simulation (DNS). The spatial distribution of droplets (Fig. 1)

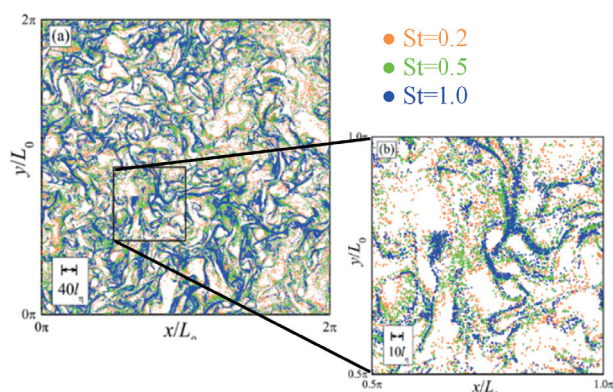


Fig. 1 Turbulent clustering for three droplet sizes.

shows that the droplet clusters for different droplet sizes are spatially correlated. An empirical model to estimate the radar reflectivity factor has been developed considering the spatial correlation, and applied to realistic cumulus data obtained by a high-resolution cloud simulation (Onishi & Takahashi, 2012 [3]). The estimated radar reflectivity factor and the increment due to turbulent clustering indicates that turbulent clustering can cause a significant error of radar cloud observations. It is expected that the results will contribute to improvement of radar observations.

## 2. Sea spray generation mechanism at wind wave air-water interfaces

Wind waves develop on the ocean surface, and the heat and water vapor transfers across the wind-wave air-water interface influence development of tropical cyclones. The transfers can be enhanced by the turbulent flows near the interface and sea sprays. Thus, this study aims to clarify the quantitative influence of wind wave turbulence and sea sprays on the heat and water vapor transfers, and the generation mechanisms of wind wave turbulence and sea sprays under the collaboration with Kyoto University. A DNS of air-water two-phase flow [4, 5] has been performed on the Earth Simulator. The results confirm the reliability of the DNS for wind waves at a low wind speed. Figure 2 shows the wind wave air-water interface observed in

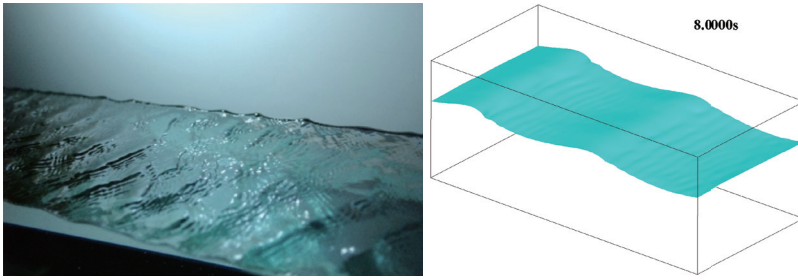


Fig. 2 Wind wave air-water interfaces under the low wind speed condition (5 m/s) observed in wind-wave tank experiment (left) and that obtained by DNS (right).

a wind-wave tank experiment (provided by Dr. N. Takagaki and Prof. S. Komori) and that obtained by the DNS. Ripple formation is observed for both experimental and numerical results. On the other hand, the Kyoto University group succeeded in reliable simulations of the atomization process. We will combine these techniques and then clarify the mechanism of sea spray generation under high speed conditions.

### 3. Evolution mechanism of turbulent patches under stably stratified conditions

Generation of local turbulent patches in stratified environments is often observed in the atmospheric boundary and oceans mixing layers. The turbulent patches are surrounded by laminar (or weakly turbulent) flows. The interface region between turbulent and nonturbulent flows (which is the so-called turbulent/nonturbulent interface) governs the development of turbulent flows. Thus, this study has investigated properties of the turbulent/nonturbulent (T/NT) interface using the DNS for the turbulent patches that spatially develop under the stratified conditions. Lagrangian tracking of fluid volumes entrained from outside of turbulence has revealed that the vortical structures near the T/NT interface play important roles for the entrainment (Fig. 3) [6]. Under the stably stratified condition, buoyancy changes the interface shape (Fig. 4), and the geometrical change reduces the total entrainment rate [7].

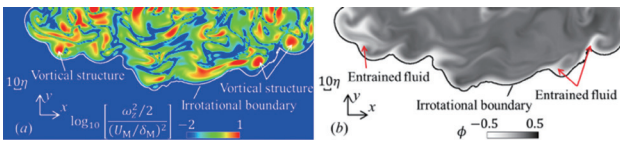


Fig. 3 (a) Vortical structures near the T/NT interface (irrotational boundary) obtained by the DNS, and (b) concentration field of entrained fluid (white).

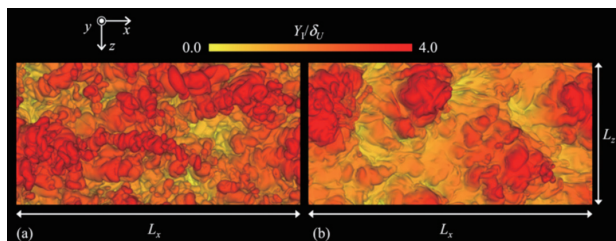


Fig. 4 Boundary of turbulent patch (T/NT interface) in (a) nonstratified mixing layer and (b) stratified mixing layer. The color shows the interface height from the centerline.

### 4. Momentum transfer in shear mixing layer in turbulence transient region

Free shear turbulence is frequently observed in atmospheric and ocean flows. This study has investigated the mechanism of momentum and scalar transfer in a shear mixing layer, in which the momentum is partially transported in the inverse gradient direction. A DNS has been performed for the shear mixing layer spatially developing from laminar flows to turbulent flows. The driving force of the inverse gradient transport is surveyed by evaluating each term of the momentum transport equations. The results show that the pressure diffusion term contributes to the inverse gradient transport at the outer edge of the mixing layer, while the pressure-strain correlation term  $-p(\partial u \partial y)$  contributes in the center of the mixing layer (Fig. 5) [8]. Further, it is clarified that the inverse gradient momentum transport appears not only in nonturbulent region but also in turbulent region.

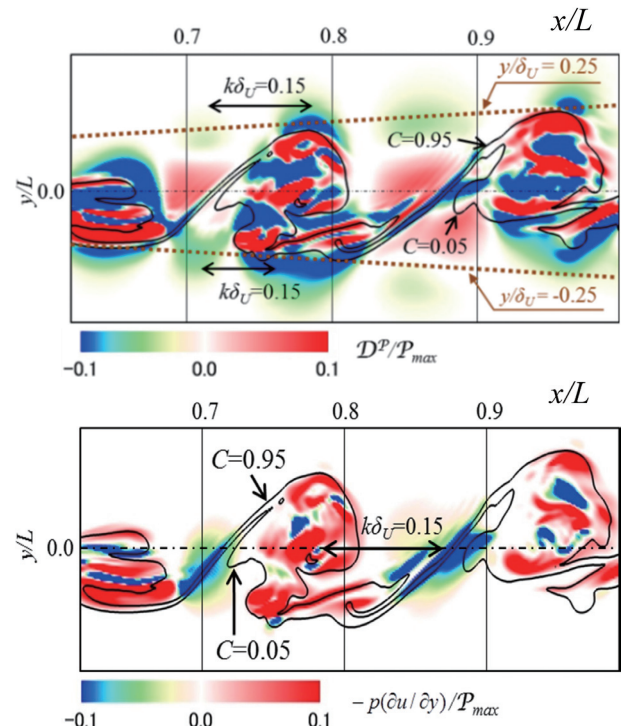


Fig. 5 Visualization of pressure diffusion term (upper) and pressure-strain correlation term  $-p(\partial u \partial y)$  (lower). These terms contribute to the inverse gradient momentum transport. Negative values (blue) indicate the inverse gradient momentum transport.

## References

- [1] K. Matsuda, R. Onishi, M. Hirahara, R. Kurose, K. Takahashi, and S. Komori, "Influence of microscale turbulent droplet clustering on radar cloud observations," *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 71, pp. 3569-3582 (2014).
- [2] K. Matsuda, R. Onishi, and K. Takahashi, "Influence of gravitational settling on turbulent droplet clustering and radar reflectivity factor," *Flow, Turbulence and Combustion*, Vol. 98, pp. 327-340 (2017).
- [3] R. Onishi and K. Takahashi, "A Warm-Bin – Cold-Bulk Cloud Microphysics Model," *Journal of the Atmospheric Science*, Vol. 69, pp. 1474-1497 (2012).
- [4] R. Kurose, N. Takagaki, A. Kimura, and S. Komori, "Direct numerical simulation of turbulent heat transfer across a sheared wind-driven gas-liquid interface," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 804, pp. 646-687 (2016).
- [5] N. Takagaki, R. Kurose, A. Kimura, and S. Komori, "Effect of Schmidt number on mass transfer across a sheared gas-liquid interface in a wind-driven turbulence," *Scientific Reports*, 6:37059 (2016).
- [6] T. Watanabe, C. da Silva, and K. Nagata, "Multi-particle dispersion during entrainment in turbulent free-shear flows," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 805, pp. 1-12 (2016).
- [7] T. Watanabe, J. Riley, and K. Nagata, "Effects of stable stratification on turbulent/non-turbulent interfaces in turbulent mixing layers," *Physical Review Fluids*, Vol. 1, 044301 (2016).
- [8] K. Takamure, Y. Ito, Y. Sakai, and K. Iwano, T. Hayase, "Direct Numerical Simulation of Momentum and Mass Transfer in a Spatially Developing Mixing Layer," *Proc. International Conference on Flow Dynamics 2016*, venue, Japan (2016).