

# 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>, 國嶋 雄一<sup>\*1</sup>, Dmitry Kolomenskiy<sup>\*1</sup>, 後藤 浩二<sup>\*2</sup>,  
 瀧上 弘光<sup>\*3</sup>, 伊藤 靖仁<sup>\*4</sup>, 高牟礼 光太郎<sup>\*4</sup>, 長田 孝二<sup>\*4</sup>, 渡邊 智昭<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 日本電気株式会社, \*3 NEC ソリューションイノベータ株式会社,  
 \*4 名古屋大学, \*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、ラグランジアン雲シミュレータによる準1次元降水再現実験の実施、乱流中での慣性粒子のクラスタリングの粒径間相関特性の解明、風波乱流場の発達および波しぶきの形成過程の解析、局所的な乱流スポットの空間発展と乱流混合機構および乱流せん断混合層におけるエネルギー散逸機構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. ラグランジアン雲モデルによる降水再現実験

降水過程において水滴がどのようなプロセスで成長するのかを直接的に明らかにするため、これまでに開発を

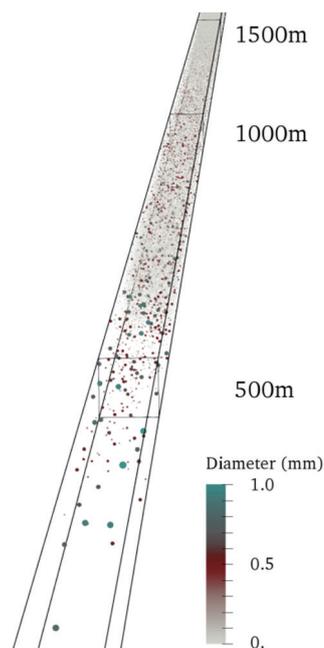


図1 ラグランジアン雲粒子追跡計算の可視化。水平方向1cm×1cm、高さ方向3kmの極端に縦長の計算領域を設定した。雲底(高度約600m)から雨粒(青、赤)が落下する様子がわかる。

進めてきたラグランジアン雲シミュレータに対し、雲凝結核活性化モデルを新たに導入し、エアロゾルから雲粒子、降水粒子(雨粒)に成長し、地表面まで落下・到達する一連の雲微物理過程を精緻に再現できる解析手法を確立した。開発した手法を鉛直方向に極端に引き延ばした領域(図1)に適用し、気象解析における降水モデルのベンチマークテストである the Kinematic Driver (KiD) を想定した解析条件を設定することにより、粒子1粒1粒の運動・成長の追跡による降水実験に世界で初めて成功した[1]。本解析結果を従来の降水モデル[2]による結果と比較し、妥当性を確認した。さらに、個々の粒子が雲粒子となってから降水粒子として地表面に至るまでのラグランジアン統計量(図2)を初めて明らかにした。

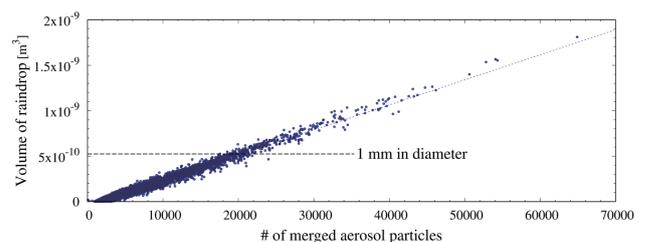


図2 地表降水粒子に関するラグランジアン統計量の例。地表到達時における雨粒の体積(縦軸)と、その雨粒を形成するエアロゾル粒子数(横軸)との関係。直径1mmの雨粒は約2万個のエアロゾルからなる。

## 2. 乱流中における雲粒のクラスタリングの粒径間マルチスケール相関特性の解析

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。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（図3(a))が雲のレーダー反射因子に及ぼす影響を予測する経験モデルを開発するために、2粒径間のクラスタリングのマルチスケール相関特性について、乱流の直接数値シミュレーション（Direct Numerical Simulation, DNS）を用いて詳細な解析を行った[3]。具体的には、2粒径間のマルチスケール相関特性を、粒子数密度間のクロススペクトルのコヒーレンスにより評価し、コヒーレンスが波数に対して指数関数的に減衰することを明らかにした（図3(b))。また、コヒーレンスの粒径組み合わせ依存性が、両粒径に対応するストークス数の差に反比例することを明らかにした（図3(c))。本成果は、レーダー観測の精度向上や、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ものと期待される。

## 3. 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、気液二相流の直接数値シミュレーション（Direct Numerical Simulation, 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、風波の発達プロセスに及ぼす表面張力の影響について解析を行った。計

算領域を主流方向に2倍に拡大し、重力表面張力波の状態までの風波の発達のDNSを実施した。その結果、表面張力を水の半分にすることによって波高が高くなることが明らかになった（図4）。また、この傾向は、風波の発達速度が速まることに起因することが明らかになった[4]。これは、風波の発達において表面張力が重要な役割を果たしていることを示している。

## 4. 局所的な乱流スポットの空間発展と乱流混合機構

環境中において、局所的な乱流のスポットが頻繁に見られる。乱流内部と外部の流体は乱流・非乱流界面層と呼ばれる層状の領域によって隔てられており、外部流体が界面層を通過し乱流内部へと取り込まれることで乱流スポットが空間的に広がっていく。流体中に拡散物質が含まれる場合、この乱流スポットの発達が乱流による物質の拡散に大きな影響を及ぼす。本研究では、孤立した乱流スポットとして噴流、混合層、乱流境界層の大規模数値計算を行った。乱流・非乱流界面層に着目した解析から乱流スポットの空間発展とそれに伴う乱流混合機構について明らかにすることを試みた[5]。

図5(a,b)は乱流境界層と混合層中の乱流・非乱流界面層の外縁を可視化したものである。乱流の様々なスケールの運動により複雑な界面が形成されていることがわかる。図5(c)では乱流・非乱流界面層近傍の平均渦度分布が噴流と乱流境界層間で比較されている。図の横軸は界面層外縁からの距離を乱流のコロモゴロフスケール $\eta$ で無次元化したものであり、渦度が大きく変化する領域の幅がいずれの流れ場でも約 $15\eta$ となっていることがわかる。

図6には気体の膨張・圧縮を伴う噴流の可視化結果を示す。気体の密度変化に伴い、噴流内で温度変化が生じる。本研究では、こうした流れの中で分子拡散と熱拡散の効果を流体粒子群でラグランジュ的にモデル化する手法を

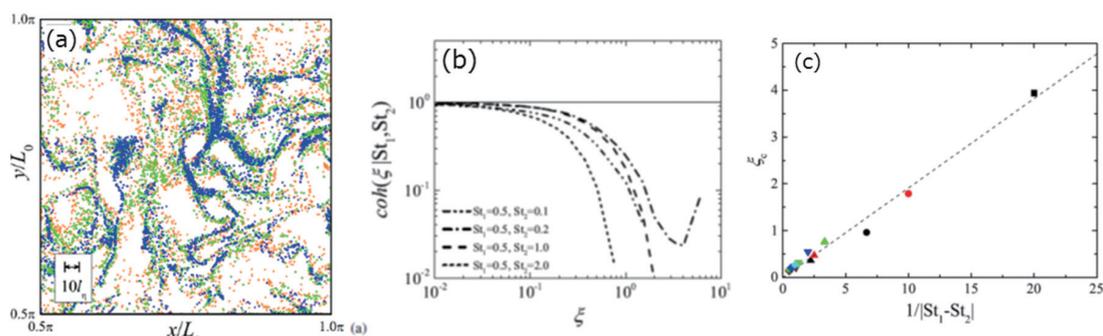


図3 (a) 乱流中の粒子クラスタリング、(b) コヒーレンスの減衰傾向、(c) コヒーレンスの減衰傾向を表す閾波数のストークス数依存性。

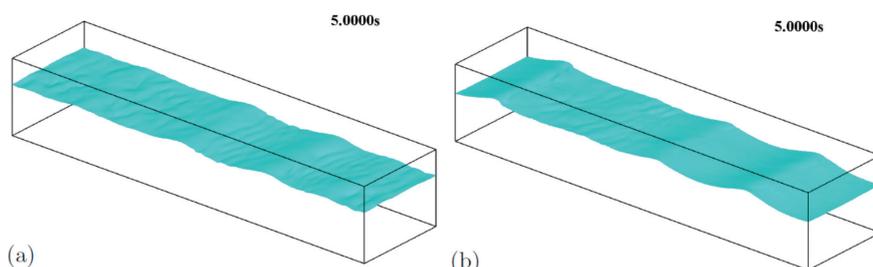


図4 風波気液界面の可視化：(a) 水の表面張力の場合、(b) 水の半分の表面張力の場合。表面張力が小さい場合の方が、波高が高い。

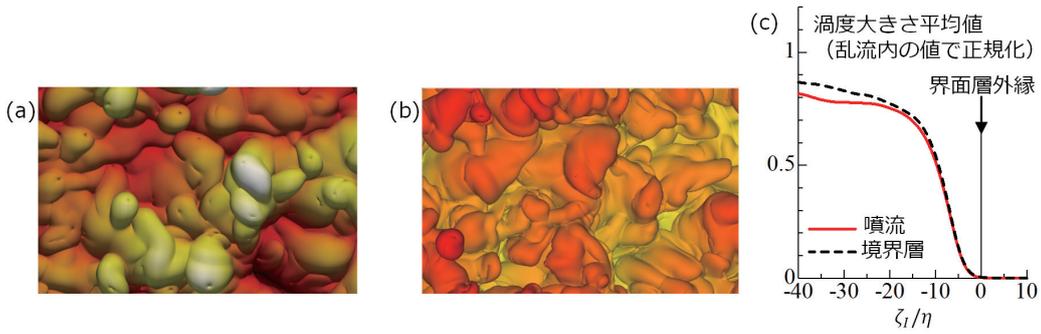


図5 (a) 乱流境界層、(b) 乱流混合層中の乱流・非乱流界面の外縁の形状。(c) 界面層近傍の渦度大きさの平均値 ( $\zeta_i > 0$ : 非乱流、 $\zeta_i < 0$ : 乱流、 $\eta$ : コロモゴロフスケール。)

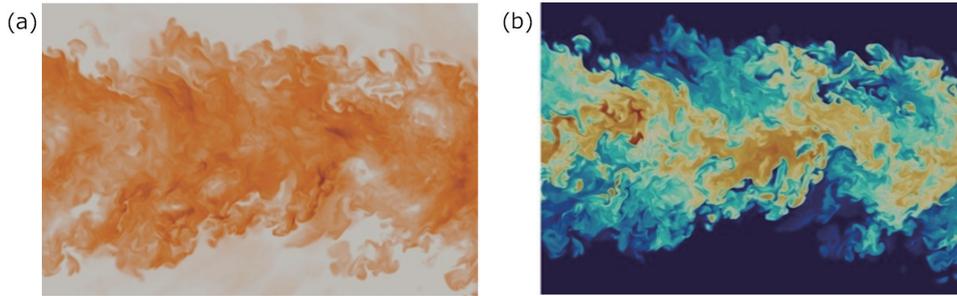


図6 気体の膨張・圧縮を伴う噴流中の (a) 温度拡散場、(b) 濃度拡散場。

提案した [6]。モデルの検証を図6の流れ場で行った結果、乱流のコア領域と外縁付近のいずれにおいても、このモデルにより分子拡散および熱拡散の効果を正確に予測できることがわかった。

### 5. せん断乱流中の大規模コヒーレント構造が乱流エネルギー散逸に及ぼす影響

せん断乱流は大気海洋を問わず環境中の様々な場に見られる流れ場であり、その発達・減衰挙動を解明することは重要である。本研究では空間発展しながら乱流遷移す

るせん断混合層流を対象とした直接数値計算を行い、せん断混合層中の乱流エネルギーの散逸係数  $C_\epsilon$  の主流方向分布を調査した [7]。その結果、図7に示すように、 $Re_\lambda$  が流下方向に減衰する完全発達領域においても、通常は一定値を取る  $C_\epsilon$  が下流方向に変化する領域が存在することが明らかになった。そこでこの原因を明らかにするために、 $C_\epsilon$  が変化している  $x/L=1.4$  と一定位置を取る  $x/L=2.0$  における速度の時系列データに対して固有直交分解 (POD) を行った。図8に、各地点における速度の生データおよび大規模コヒーレント構造に相当する第1モードの再構成図を

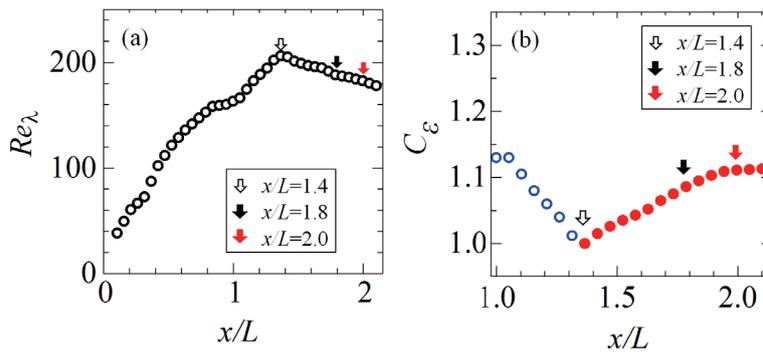


図7 (a)  $Re_\lambda$  および (b)  $C_\epsilon$  の下流方向変化。

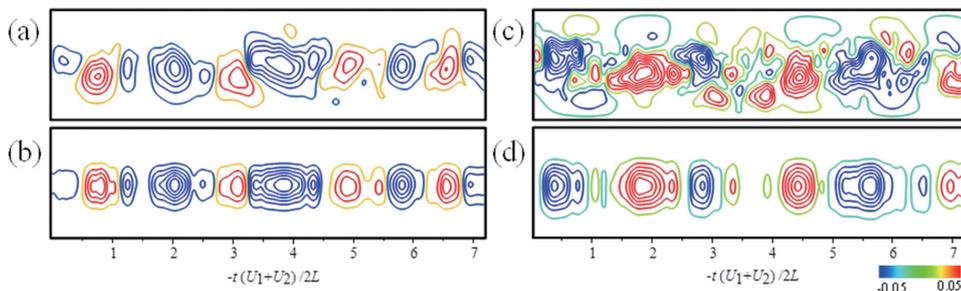


図8 再構成された主流方向の速度変動。(a, b)  $x/L=1.4$ 、(c, d)  $x/L=2.0$ 。(a, c) 生データ、(b, d) 第1PODモード。

示す。図より、いずれの場所においても周期的な大規模渦構造が存在することがわかる。しかし、この渦構造の周期と大きさを解析したところ、その周期は変わらないものの、 $x/L=2.0$ における渦の大きさの分散の値は $x/L=1.4$ における値より約2.7倍大きいことが明らかになった。つまり、コヒーレント渦の大きさが比較的均一な流れ場において $C_e$ が一定とならない、すなわち乱流エネルギー散逸が非平衡的挙動を示すと言える。

## 文献

- [1] Y. Kunishima and R. Onishi, "Direct Lagrangian tracking simulation of droplet growth in vertically developing cloud," *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 10.5194/acp-2018-328, in review (2018).
- [2] R. Onishi and K. Takahashi, "A Warm-Bin – Cold-Bulk Cloud Microphysics Model," *J. Atmos. Sci.*, 69, 1474-1497 (2012).
- [3] K. Matsuda and R. Onishi, "Turbulent enhancement of radar reflectivity factor for polydisperse cloud droplets," *Atmos. Chem. Phys.*, submitted.
- [4] K. Matsuda, N. Takagaki, R. Onishi and S. Komori, "Effects of surface tension reduction on development of wind-driven gravity-capillary waves," *IUTAM Sym. on Wind Waves*, London, UK (2017).
- [5] T. Watanabe, J. Riley and K. Nagata, "Turbulent entrainment across turbulent-nonturbulent interfaces in stably stratified mixing layers," *Phys. Rev. Fluids*, 2, 104803 (2017).
- [6] T. Watanabe and K. Nagata, "Gradients estimation from random points with volumetric tensor in turbulence," *J. Comput. Phys.*, 350, 518-529 (2017).
- [7] K. Takamure, Y. Ito, Y. Sakai, K. Iwano and T. Hayase, "Transition of Local Homogeneity in a Turbulent Mixing Layer," *Proc. 14th Int. Conf. on Flow Dyn.*, Sendai, Japan (2017).

# 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>, Yuichi Kunishima<sup>\*1</sup>, Dmitry Kolomenskiy<sup>\*1</sup>, Koji Goto<sup>\*2</sup>, Hiromitsu Fuchigami<sup>\*3</sup>, Yasumasa Ito<sup>\*4</sup>, Kotaro Takamura<sup>\*4</sup>, Koji Nagata<sup>\*4</sup>, Tomoaki Watanabe<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 Corporation,

\*3 NEC Solution Innovators, Ltd., \*4 Nagoya 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) Direct tracking simulation of individual droplet motions in a vertically developing cloud is achieved by the Lagrangian Cloud Simulator (LCS); (ii) multiscale turbulent clustering of polydispersed cloud droplets is investigated and modeled; (iii) the wind wave development mechanism is investigated by using a DNS of air-water two-phase flow; (iv) spatial development of turbulent patches and corresponding turbulent mixing mechanism near turbulent/nonturbulent interfaces are investigated and Lagrangian diffusion model is proposed; (v) effects of large-scale coherent structure in a transient shear mixing layer on the turbulent energy dissipation is clarified.

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

## 1. Quasi-one-dimensional simulation of cloud droplet growth using the Lagrangian Cloud Simulator (LCS)

The Lagrangian Cloud Simulator (LCS) has been upgraded to compute all the warm-rain processes in a vertically developing cloud, including cloud condensate nuclei (CCN)

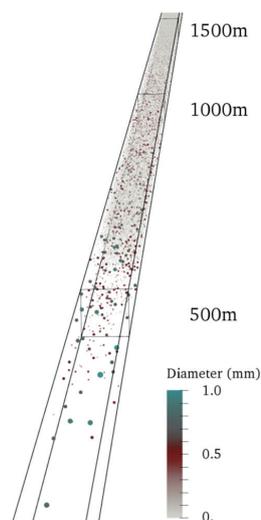


Fig. 1 Lagrangian droplets in the extremely vertically elongated quasi-one-dimensional domain. The horizontal domain size is  $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ , while the vertical length is 3 km. Raindrops (blue and red) are settling from the cloud.

activation, condensational growth, collisional growth, and droplet gravitational settling. The LCS has been applied to a benchmark precipitation experiment case, the Kinematic Driver (KiD), using an extremely vertically elongated quasi-one-dimensional domain (Fig. 1). This pioneering simulation achieved direct tracking of individual droplet motions and their growth to raindrops [1], allowing analyses of Lagrangian statistics of raindrops. The comparison with a conventional cloud microphysics model [2] confirmed the reliability of the direct tracking simulation.

## 2. Multiscale correlation of turbulent clustering for bidispersed droplets

Cloud droplets distribute nonuniformly in turbulence. Recent studies revealed that turbulent clustering of monodispersed droplets can increase the radar reflectivity factor of convective clouds. In order to estimate the quantitative influence in actual radar observations, however, it is necessary to develop a parameterization considering droplet size distributions. Thus, this study has investigated a multiscale spatial correlation of turbulent clustering for two droplet sizes [3]. Fig. 2 shows the spatial distribution of droplets obtained by the three-dimensional direct numerical simulation (DNS). The multiscale correlation of clustering was represented by the coherence of

cross spectrum for droplet number density fluctuations. The results show that the coherence decreases exponentially as the wavenumber increases. The decaying trend of the coherence has been parameterized considering the Stokes number dependence. It is expected that the proposed parameterization will contribute to improvement of radar observations.

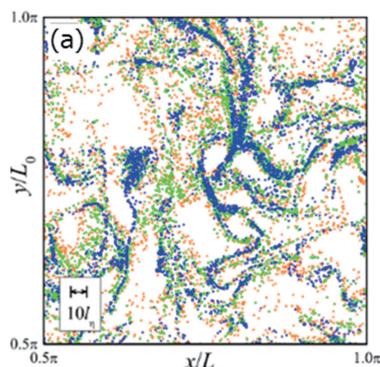


Fig. 2 Turbulent clustering of droplets.

### 3. Wind wave development and sea spray generation mechanisms at air-water interfaces

The heat and water vapor transfers across the wind-wave air-water interface can be enhanced by the turbulent flows near the interface and sea sprays. Thus, this study aims to clarify the generation mechanisms of wind wave turbulence and sea sprays and the quantitative influence on the heat and water vapor transfers. A DNS of air-water two-phase flow has been performed to clarify the influence of surface tension change on the development of wind waves. The results show that the significant wave height for the small surface tension case increases faster than that for the large surface tension case [4]. This result indicates that the reduction of surface tension enhances the development of wind waves.

### 4. Spatial development and turbulent mixing mechanism of local turbulent patches

Local turbulent patches in laminar flows are often observed in the atmospheric boundary and oceans mixing layers. The development of turbulent patches is attributed to entrainment of nonturbulent fluid through the interface region between turbulent and nonturbulent flows, which is the turbulent/nonturbulent (T/NT) interface. The development of turbulent patches have significant influence on the turbulent diffusion of scalar. Thus, this study aims to investigate the spatial development of turbulent patches and corresponding turbulent mixing mechanism using the DNS for the isolated turbulent patches such as planer jet, mixing layer, and turbulent boundary layer [5]. Fig. 3 shows the temperature and scalar concentration distributions in a compressible gaseous jet. This study has proposed a model to compute the effects of molecular and thermal diffusions using Lagrangian fluid particles [6]. It is confirmed that the proposed model predicts the diffusion effects

at the turbulent core region and those around the T/NT interface in a good accuracy.

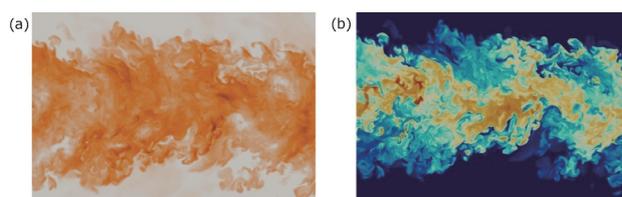


Fig. 3 (a) Temperature and (b) scalar concentration distributions in a compressible gaseous jet.

### 5. Effects of large-scale coherent structure in sheared turbulence on the dissipation of turbulent energy

Free shear turbulence is frequently observed in atmospheric and ocean flows. This study has investigated the turbulent energy dissipation mechanism in a shear mixing layer spatially developing from laminar to turbulence [7]. The turbulent energy dissipation coefficient  $C_\epsilon$  was evaluated by performing a DNS. The results show that  $C_\epsilon$  varies in the fully developed turbulence region (Fig. 4), where  $Re_\lambda$  decreases in the streamwise direction, though  $C_\epsilon$  is typically constant. The proper orthogonal decomposition (POD) for the time series of the velocity implies that the  $C_\epsilon$  variation is caused by a non-equilibrium turbulent energy dissipation in a flow filled with almost uniform-size coherent vortices.

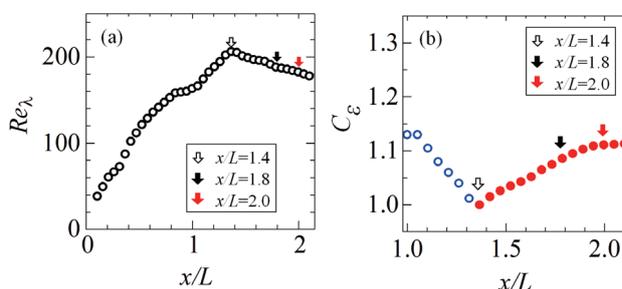


Fig. 4 Variation of (a)  $Re_\lambda$  and (b)  $C_\epsilon$  in the streamwise direction

### References

- [1] Y. Kunishima and R. Onishi, "Direct Lagrangian tracking simulation of droplet growth in vertically developing cloud," *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 10.5194/acp-2018-328, in review (2018).
- [2] R. Onishi and K. Takahashi, "A Warm-Bin – Cold-Bulk Cloud Microphysics Model," *J. Atmos. Sci.*, 69, 1474-1497 (2012).
- [3] K. Matsuda and R. Onishi, "Turbulent enhancement of radar reflectivity factor for polydisperse cloud droplets," *Atmos. Chem. Phys.*, submitted.
- [4] K. Matsuda, N. Takagaki, R. Onishi and S. Komori, "Effects of surface tension reduction on development of wind-driven gravity-capillary waves," *IUTAM Sym. on Wind Waves*, London, UK (2017).
- [5] T. Watanabe, J. Riley and K. Nagata, "Turbulent entrainment across turbulent-nonturbulent interfaces in

- stably stratified mixing layers,” *Phys. Rev. Fluids*, 2, 104803 (2017).
- [6] T. Watanabe and K. Nagata, “Gradients estimation from random points with volumetric tensor in turbulence,” *J. Comput. Phys.*, 350, 518-529 (2017).
- [7] K. Takamure, Y. Ito, Y. Sakai, K. Iwano and T. Hayase, “Transition of Local Homogeneity in a Turbulent Mixing Layer,” *Proc. 14th Int. Conf. on Flow Dyn.*, Sendai, Japan (2017).

