

安定密度成層下の三次元局所乱流塊による内部重力波放出

課題責任者

渡邊 智昭

名古屋大学大学院工学研究科

著者

渡邊 智昭*¹, 長田 孝二*¹, 長尾 茉奈*¹, 田中 秀征*¹,

松田 景吾*², 大西 領*²

*¹ 名古屋大学大学院 工学研究科, *² 海洋研究開発機構 地球情報基盤センター

大気・海洋中に現れる安定密度成層下の流れ（海洋混合層など）では乱流運動により内部重力波が誘起される。内部重力波は乱流中のエネルギーを遠方まで伝搬するほか、砕波により乱流が生成され運動エネルギーの散逸や異なる密度を持つ流体の混合を引き起こす。乱流が誘起する内部重力波の特性は乱流の時間や長さスケールに依存する。乱流構造は乱流の特性スケールに密接に関連しており、乱流により誘起される内部重力波の特性においても乱流構造が重要となると考えられる。本課題では安定密度成層下の乱流混合層の直接数値計算を行い、安定密度成層下の乱流構造について調査した。安定密度成層下の混合層ではヘアピン渦や流れ方向に長い乱流構造が存在し、これらの構造が乱流混合や乱流エネルギーに大きな影響を及ぼしていることを明らかにした。乱流構造について安定密度成層下の乱流と壁乱流の比較を行うため、乱流境界層の直接数値計算を行った。境界層の直接数値計算結果から、乱流の空間発展機構や乱流・非乱流界面近傍でのスカラー混合の特性を明らかにした。

キーワード：乱流, 安定密度成層, 内部重力波, 直接数値計算, 乱流・非乱流界面

1. 結論

大気や海中では温度や塩分濃度の分布により安定な密度成層が形成される[1]。安定密度成層下では鉛直方向の乱流運動が抑制されるものの、小スケールの活発な乱流が局所的に現れる。乱流内では物質やエネルギーの混合が生じるため、乱流塊の空間的な分布が流れ場全体の特性に大きな影響を与えている[2]。そのため、安定密度成層下の乱流塊の空間分布は乱流プラントル数などの計算パラメータのモデル化[3]においても重要な要素となる。安定密度成層中の流体は浮力を復元力とする内部重力波を伝播させる。乱流運動により誘起される内部重力波の特性は乱流特性（長さスケールなど）に強く依存する。乱流構造は流れの特性スケールと強い関連を持ったため、乱流が誘起する内部重力波の特性においても重要となる。

本課題では、安定密度成層下の乱流構造やその空間分布を明らかにするため、安定密度成層中の混合層の直接数値計算を行った。本課題で得られた大規模な数値計算データベースの解析により、混合層内の大規模乱流構造や小スケール渦構造を調査した。また、乱流構造と密度や運動量の輸送の関連を明らかにした。

2. 安定密度成層中の混合層の直接数値計算

2.1 計算方法

本課題では安定密度成層中の時間発展型混合層の直接数値計算を行った。計算の詳細は文献[4, 5, 6]に示されている。支配方程式はブシネスク近似を施したナビエ・ストークス方程式である。時間発展型混合層では流れ(x)方向とスパン(y)方向が統計的に一様であるため、これらの方向には周期境界条件が用いられる。また、鉛直(z)

方向境界を滑り壁とした。x方向平均速度と密度の鉛直(z)方向の初期分布を双曲線正接関数により与えた。与えられた初期条件から乱流混合層が時間とともに計算領域内で発達する。本課題では大スケール乱流構造や小スケール渦構造の空間分布を調査するため、従来の数値計算よりも水平方向に大きい計算領域を用いた。数値計算には最大で約330億点の計算格子を用いた。

本課題で使用した計算コードでは有限差分法により

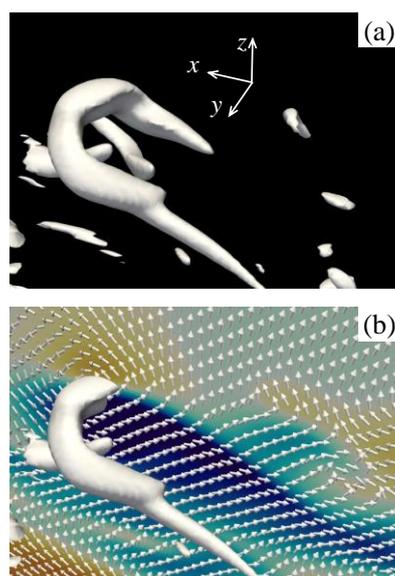


図1 (a) 混合層上面の渦構造の拡大図, (b) 渦構造近傍の変動速度ベクトルとx方向速度変動（赤：x方向速度変動正, 青：x方向速度変動負）

支配方程式を数値的に解く。水平方向および鉛直方向にそれぞれ四次精度、二次精度の中心差分を、時間積分に三次精度のルンゲ・クッタ法を用いた。また、圧力のポアソン方程式の解法にはBiCGSTAB法を用いた。

2.2 乱流構造の可視化

乱流が発達し十分に時間がたった後の混合層中の渦構造の一つを可視化した結果を図1に示す。白色は速度勾配テンソルの第二不変量の正の等値面を用いて可視化された渦構造であり、色は x 方向速度変動を表す。混合層中の渦構造は壁乱流で見られるヘアピン渦に類似した形をしていることがわかる。図1(b)に示す速度ベクトルではヘアピン渦の頭の周りに旋回運動が存在し、鉛直方向の速度変動を引き起こしている。このような鉛直方向の速度変動は異なる密度を持つ流体の混合に大きく寄与する。

図2に混合層上面あるいは内部の渦構造を示す。混合層には多数の小スケール渦構造が存在する。上面に現れる渦構造の多くは図1に示したヘアピン渦である。多数

の渦構造が青色の領域(x 方向速度変動が負)の上に存在しており、渦構造の分布と乱流速度分布に関連があることがわかる。

混合層中心の水平断面における x 方向速度変動を図3に示す。時間とともに x 方向に長い速度変動の正負のパターンが現れる。その長さは混合層厚さの10倍程度となっており、流れ方向に非常に長い乱流構造が存在することがわかる。ヘアピン渦や速度場に現れる流れ方向に長い乱流構造は乱流境界層やチャンネル乱流などの壁乱流でも見られる[7, 8, 9]。本課題の数値計算により、壁乱流と類似した乱流構造が安定密度成層中の混合層に存在することが明らかになった。

安定密度成層下の乱流で重要なパラメータである浮力レイノルズ数はオズミドフスケール L_0 とコロモゴロフスケール η を用いて、 $Re_b = (L_0/\eta)^{4/3}$ と定義される。オズミドフスケールより大きいスケールの運動は浮力により強く抑制される。コロモゴロフスケールは乱流の最小長さスケールを表す。様々な条件下で数値計算を行った結果、ヘアピン渦や流れ方向に長い乱流構造が現れる

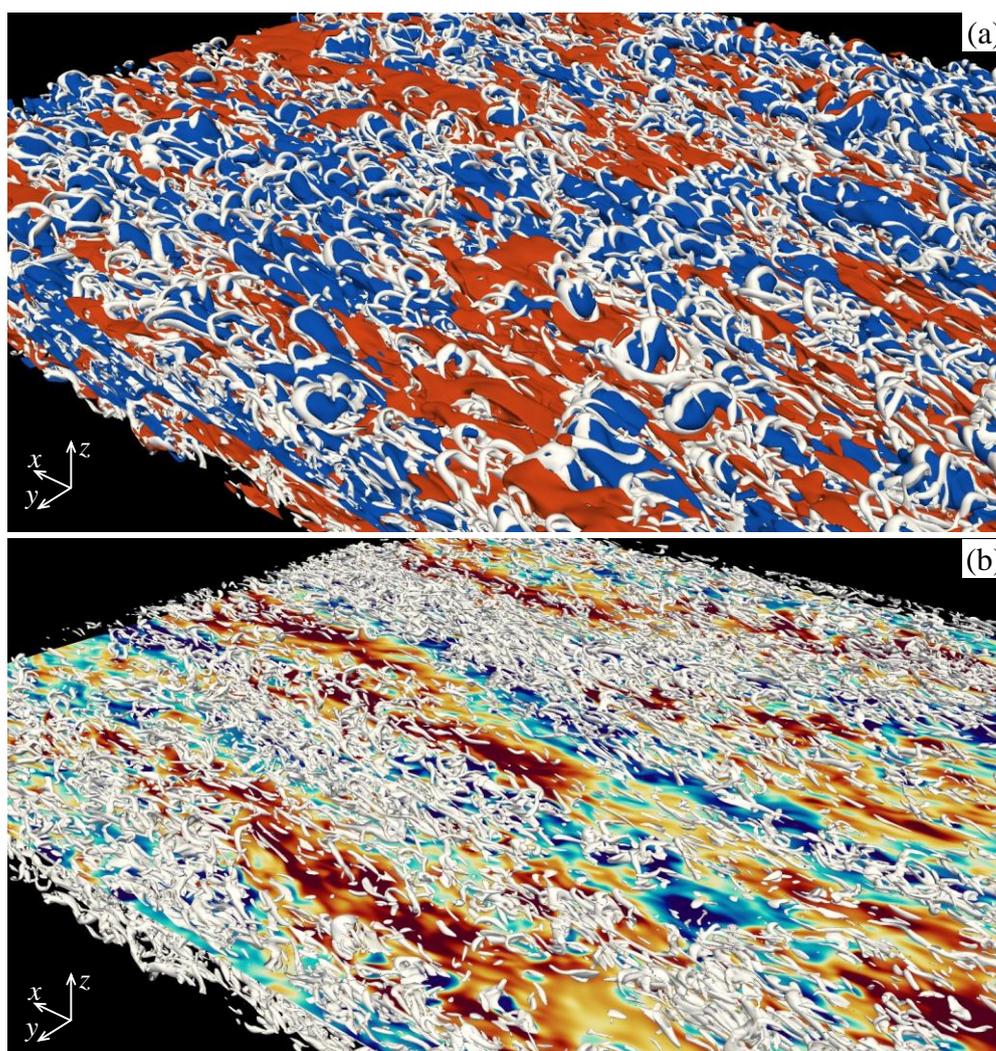


図2 安定密度成層中の(a)混合層上面と(b)混合層内部の渦構造 (白色)
赤： x 方向速度変動正，青： x 方向速度変動負

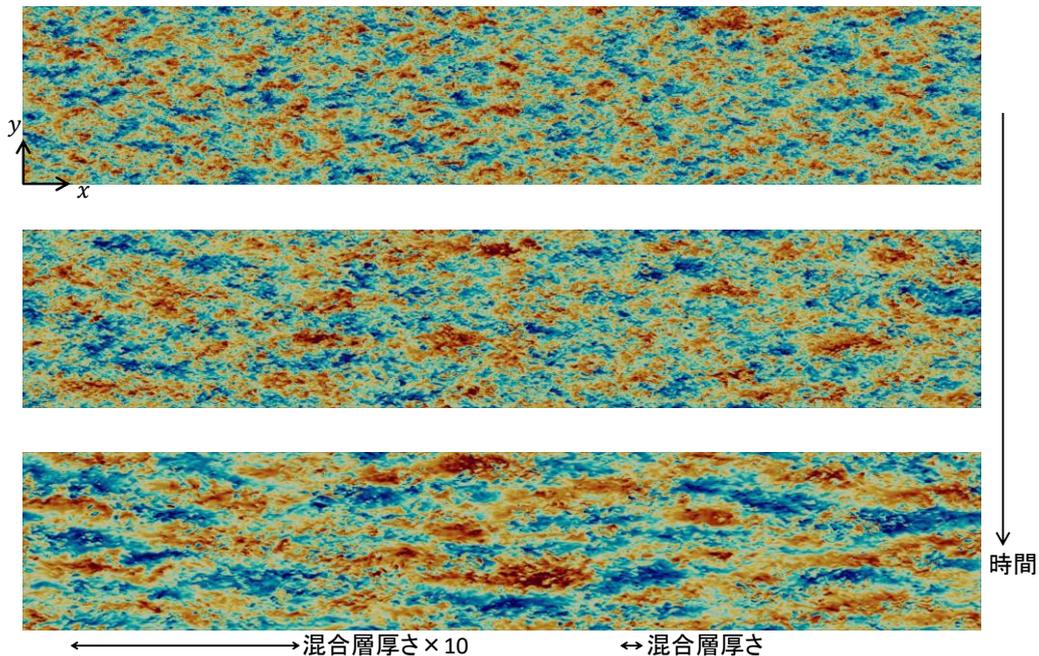


図3 混合層中心の水平断面での x 方向速度変動 (赤：速度変動正，青：速度変動負)

のは、乱流速度変動が減衰し浮力レイノルズ数が 10^0 のオーダーまで小さくなる時であることがわかった[6].

2.3 スペクトル解析

図4に流れ方向速度変動のエネルギースペクトルを鉛直方向位置 z と x 方向波長 λ_x に対してプロットした結果を示す。 z と λ_x は混合層厚さ δ_{mix} で無次元化されている。混合層上部 ($z/\delta_{mix} = 0.4$) では $\lambda_x/\delta_{mix} = 1$ 付近にスペクトルのピークが見られる。これは、多数のヘアピン渦が混合層上部に存在しており、 δ_{mix} 程度の長さを持つヘアピン渦の下に低速領域が現れるためである。一方、混合層内部 ($z/\delta_{mix} < 0.2$) ではスペクトルのピークが $\lambda_x/\delta_{mix} = 1$ 付近に見られる。この波長は図3で可視化された流れ方向に長い乱流構造の長さによく一致する。このように、ヘアピン渦や流れ方向に長い乱流構造に伴う速度変動が乱流エネルギーに大きな寄与を持つことがわかる。

本課題では乱流による密度・運動量輸送のスペクトル解析も行った。その結果、図1にみられるヘアピン渦の長さと同程度の長さスケールの変動によって、密度と運動量の乱流拡散が活発に起こっていることが明らかとなった[6]。また、乱流構造について安定密度成層中の混合層と壁乱流を比較するため、乱流境界層のDNSも行った。乱流境界層のDNSは乱流の空間発展やスカラ混合において重要な役割を果たす乱流・非乱流界面の特性の調査にも用いられた[10, 11].

文献

[1] Smyth, W. D. and Moum, J. N., "Ocean mixing by Kelvin-Helmholtz instability," *Oceanography*,

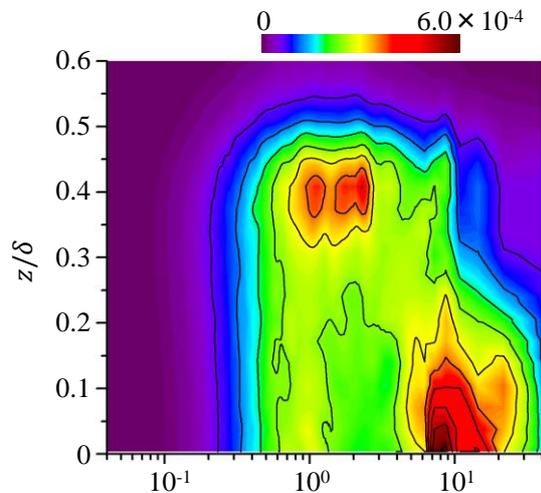


図4 流れ方向速度変動のエネルギースペクトル $E_{int}(k_x)$. k_x は x 方向波数, $\lambda_x = 2\pi/k_x$ は波長, δ_{mix} は混合層厚さ, U_0 は混合層の速度差を表す.

25, pp. 140-149 (2012)

[2] Portwood, G. D., de Bruyn Kops, S. M., Taylor, J. R., Salehipour, H., and Caulfield, C. P., "Robust identification of dynamically distinct regions in stratified turbulence," *J. Fluid Mech.*, 807, R2 (2016)

[3] Salehipour, H., Peltier, W. R., Whalen, C. B., and MacKinnon, J. A., "A new characterization of the turbulent diapycnal diffusivities of mass and

- momentum in the ocean,” *Geophys. Res. Lett.*, 43, pp. 3370-3379 (2016)
- [4] Watanabe, T., Riley, J. J., and Nagata, K., “Effects of stable stratification on turbulent/nonturbulent interfaces in turbulent mixing layers,” *Phys. Rev. Fluids*, 1, 044301 (2016)
- [5] Watanabe, T., Riley, J. J., and Nagata, K., “Turbulent entrainment across turbulent-nonturbulent interfaces in stably stratified mixing layers,” *Phys. Rev. Fluids*, 2, 104803 (2017)
- [6] Watanabe, T., Riley, J. J., Nagata, K., Matsuda, K., and Onishi, R., “Hairpin vortices and highly elongated flow structures in a stably-stratified shear layer,” *J. Fluid Mech.*, 878, pp. 37-61 (2019)
- [7] Wu, X. and Moin, P., “Direct numerical simulation of turbulence in a nominally zero-pressure-gradient flat-plate boundary layer,” *J. Fluid Mech.*, 630, pp. 5-41 (2009)
- [8] Hutchins, N. and Marusic, I., “Evidence of very long meandering features in the logarithmic region of turbulent boundary layers,” *J. Fluid Mech.*, 579, pp. 1-28 (2007)
- [9] Hellström, L. H. O., Sinha, A., and Smits, A. J., “Visualizing the very-large-scale motions in turbulent pipe flow,” *Phys. Fluids*, 23, 011703 (2011)
- [10] Zhang, X., Watanabe, T., Nagata, K., “Turbulent/non-turbulent interfaces in high resolution direct numerical simulation of temporally-evolving compressible turbulent boundary layers,” *Phys. Rev. Fluids*, 3, 094605 (2018)
- [11] Zhang, X., Watanabe, T., Nagata, K., “Passive scalar mixing near turbulent/non-turbulent interface in compressible turbulent boundary layers,” *Phys. Scr.*, 94, 044002 (2019)

Internal Gravity Wave Emission from Three-dimensional Turbulent Spot

Project Representative

Tomoaki Watanabe

Department of Aerospace Engineering, Nagoya University

Authors

Tomoaki Watanabe^{*1}, Koji Nagata^{*1}, Mana Nagao^{*1}, Shusei Tanaka^{*1},
Keigo Matsuda^{*2}, Ryo Onishi^{*2}

^{*1}Department of Aerospace Engineering, Nagoya University,

^{*2}Center for Earth Information Science and Technology, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Stably stratified turbulence often induces internal gravity waves, which transfer energy and momentum from the wave source. Turbulent structures are important in the internal gravity wave generation because the structures are associated with turbulent motions with specific length and time scales. This project investigates turbulent flow structures in a stably stratified flow. Direct numerical simulations (DNS) are performed for a stably stratified shear layer with a very large computational domain. Our simulations confirm that hairpin vortices appear in the stably stratified shear layer and they promote turbulent mixing of density and momentum. Very long structures elongated in the streamwise direction are also identified in streamwise velocity profiles. Both hairpin vortices and elongated flow structures make a large contribution to turbulent kinetic energy. DNS is also conducted for turbulent boundary layers, whose flow structures are similar to those found in the stably stratified shear layer.

Keywords : Turbulence, Stable stratification, Internal gravity wave, Direct numerical simulations, Turbulent/non-turbulent interface

1. Direct numerical simulations of a stably stratified shear layer

Turbulent flow structures are important in internal gravity waves induced by turbulence. Wavelengths of the internal gravity waves are often determined by characteristic length scales of turbulence, which are strongly affected by the turbulent flow structures. We have employed direct numerical simulations (DNS) in order to investigate turbulent structures in a stably stratified flow. DNS have been performed for a

stably-stratified, temporally-evolving, shear layer where shear and stratification are localized in a thin layer [1]. A DNS code based on finite difference methods solves the incompressible Navier-Stokes equations within the Boussinesq approximation. The streamwise, spanwise, and vertical directions are denoted by x , y and z , respectively. Periodic boundary conditions are applied in the horizontal (x and y) directions. The DNS is initialized with the vertical profiles of mean streamwise velocity and density given as hyperbolic tangent functions,

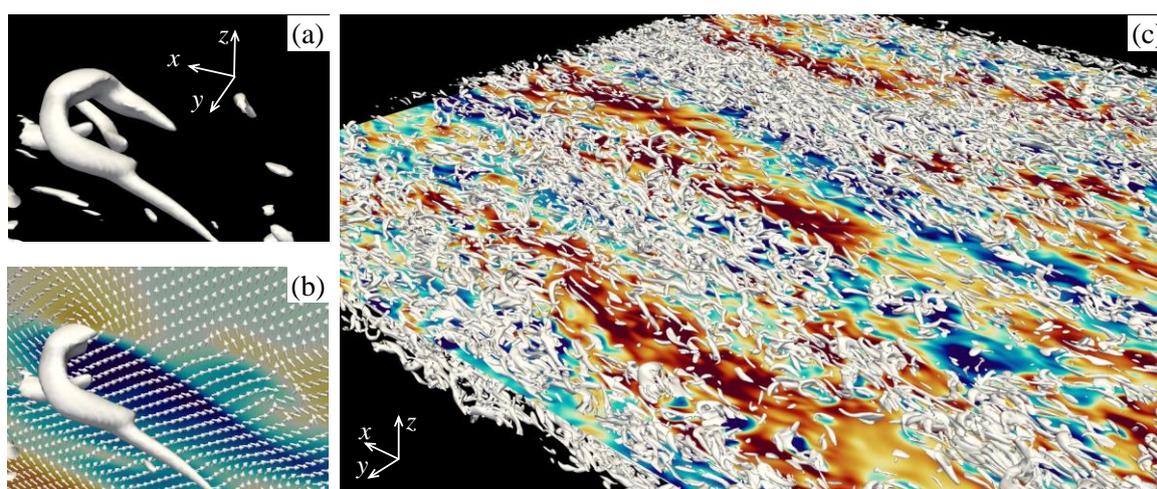


Fig. 1 (a) One of small-scale vortical structures at the top of the stable stratified shear layer. (b) The same vortex as in (a) is shown with color contours of streamwise velocity fluctuations and fluctuating velocity vectors on the x - z plane crossing the head of the hairpin vortex. (c) Small-scale vortical structures in the middle of the stable stratified shear layer. Color contours show the streamwise velocity fluctuation. In these figures, isosurface of second invariant of velocity gradient tensor is used for visualizing vortices.

each with thickness h_0 . Details of the DNS can be found in [2,3,4]. A computational domain with a size of $(448h_0, 84h_0, 140h_0)$ is large enough to investigate large-scale flow structures.

2. Turbulent structures of a stably stratified shear layer

Figure 1(a) visualizes one of small-scale vortices found at the top of the stable stratified shear layer. The vortex has a hairpin shape, and is similar to the hairpin vortex found in turbulent boundary layers [5]. A large number of vortices with a hairpin shape appear at the top of the stably-stratified shear layer. Figure 1(b) shows the same hairpin vortex with color contours of streamwise velocity fluctuation and velocity fluctuating vectors. The hairpin vortex appears with negative velocity fluctuations (blue) between the legs of the hairpin vortex. The head of the vortex induces a rotating motion, which contributes to vertical transfers of density and momentum.

Figure 1(c) shows small-scale vortices in the middle of the shear layer. The distributions of vortices are intermittent in space. More vortices appear over the regions with negative streamwise velocity fluctuations (blue). Regions with positive and negative streamwise velocity fluctuations display elongated patterns in the streamwise direction. The streamwise length of these patterns is about 10 times of the shear layer thickness, and highly elongated flow structures appear in the stably stratified shear layer.

3. Spectral analysis

Figure 2 shows an energy spectrum of streamwise velocity fluctuations. Spectral peaks can be found at $\lambda_x/\delta_i = 1$ near the top of the shear layer and at $\lambda_x/\delta_i = 10$ in the middle of the shear layer. These peaks are close to the streamwise length scales of the hairpin vortices and highly elongated flow structures found in Fig. 1. Therefore, the flow structures identified in Fig. 1 make large contributions to turbulent kinetic energy. Further spectral analysis has also confirmed that the hairpin vortices largely contribute to turbulent mixing of density and momentum [4].

We have also conducted DNS of a turbulent boundary layer, and compared the flow structures between the boundary layer and the stably stratified shear layer. The DNS database of the turbulent boundary layer has also been used for investigating the turbulent/non-turbulent interface in the turbulent boundary layer [6, 7].

References

- [1] Smyth, W. D. and Moum, J. N., "Ocean mixing by Kelvin-Helmholtz instability," *Oceanography*, 25, pp. 140-149 (2012)
- [2] Watanabe, T., Riley, J. J., and Nagata, K., "Effects

of stable stratification on turbulent/nonturbulent interfaces in turbulent mixing layers," *Phys. Rev. Fluids*, 1, 044301 (2016)

- [3] Watanabe, T., Riley, J. J., and Nagata, K., "Turbulent entrainment across turbulent-nonturbulent interfaces in stably stratified mixing layers," *Phys. Rev. Fluids*, 2, 104803 (2017)
- [4] Watanabe, T., Riley, J. J., Nagata, K., Matsuda, K., and Onishi, R., "Hairpin vortices and highly elongated flow structures in a stably-stratified shear layer," *J. Fluid Mech.*, 878, pp. 37-61 (2019)
- [5] Wu, X. and Moin, P., "Direct numerical simulation of turbulence in a nominally zero-pressure-gradient flat-plate boundary layer," *J. Fluid Mech.*, 630, pp. 5-41 (2009)
- [6] Zhang, X., Watanabe, T., Nagata, K., "Turbulent/non-turbulent interfaces in high resolution direct numerical simulation of temporally-evolving compressible turbulent boundary layers," *Phys. Rev. Fluids*, 3, 094605 (2018)
- [7] Zhang, X., Watanabe, T., Nagata, K., "Passive scalar mixing near turbulent/non-turbulent interface in compressible turbulent boundary layers," *Phys. Scr.*, 94, 044002 (2019)

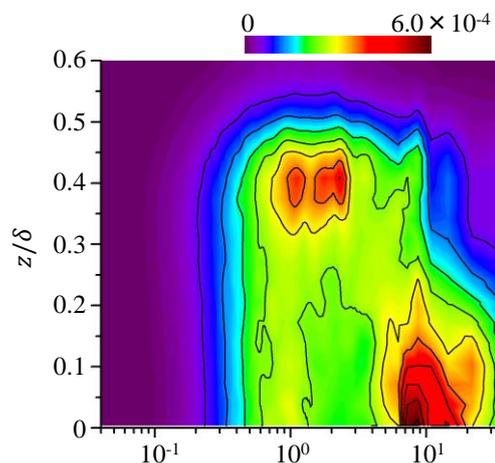


Fig. 2 Energy spectrum of streamwise velocity fluctuation $E_{iii}(k_x)$. Here, k_x is wavenumber in the x direction, $\lambda_x = 2\pi/k_x$ is wavelength, δ_i is mixing layer thickness, U_0 is velocity difference across the mixing layer.