

小スケールのせん断不安定性による乱流熱拡散促進

課題責任者

渡邊 智昭

京都大学大学院工学研究科

著者

渡邊 智昭^{*1}、長田 孝二^{*1}

^{*1} 京都大学大学院工学研究科

キーワード：乱流、拡散、混合、噴流

1. 緒言

乱流による熱や物質の拡散は環境中の流れにおいて重要な役割を果たす。乱流中の小スケール速度変動に伴う微細せん断層構造は特定の波長（層厚みの約7倍）の擾乱に対して著しく不安定であり、この波長の擾乱を乱流に付加すると微細せん断層の崩壊を介して乱流混合が促進されることが近年示された[1-4]。乱流による流体輸送は熱や物質の拡散を引き起こすことから、微細せん断層の不安定性は擾乱を利用した乱流熱拡散促進手法として期待される。本研究では、主流中に噴出する旋回噴流を対象に、熱拡散促進への応用を目指した直接数値計算を実施した[5]。

2. 主流と直行する旋回噴流群の直接数値計算

計算対象は、直交流中に壁面の円形孔から噴出する、わずかに加熱された複数の旋回噴流（3列×5列の計15本）であり、温度は浮力を無視したパッシブスカラーとして扱う。支配方程式は非圧縮ナビエ・ストークス方程式と温度輸送方程式である。主流速度を U_∞ 、噴流速度を U_j 、噴流径を D 、主流温度を T_∞ 、噴流温度を T_j 、動粘度を ν 、熱拡散係数を κ とする。主流速度基準のレイノルズ数を $Re = U_\infty D / \nu = 2100$ 、プラントル数を $Pr = \nu / \kappa = 1$ 、速度比 $U_j / U_\infty = 3.3$ ($Re_j = U_j D / \nu = 6930$)を固定したうえで、旋回数 $Sw = 0, 0.2, 0.4, 0.6$ の4条件を比較した。

主流方向を x 、スパン方向を y 、鉛直方向を z とする。計算領域は $(L_x, L_y, L_z) = (50.4D, 10D, 24D)$ である。噴流は主流方向に三つ、スパン方向に五つ配置され、噴流中心は $x = 2.7D, 4.7D, 6.7D, y = 1D, 3D, 5D, 7D, 9D$ （間隔 $2D$ ）である。 y 方向は周期境界とした。境界条件は、底面を滑り無し壁、上面を滑り壁とした。噴流口では、旋回を有する内部流れの速度分布を Sw に応じて設定した[6]。主流の流入条件として境界層速度分布を与え、流出には対流流出条件を用いた[7]。計算格子点数は $4080 \times 800 \times 1920$ とした。格子点位置は x および y 方向に一樣であり、 z 方向には壁面近傍の解像度を上げるため不等間隔格子を用いた。統計量は、流れが統計的に定常となる $t \geq 100(D/U_j)$ の時間平均()で評価した。

直接数値計算には有限差分法に基づくコードを用いた[8]。ナビエ・ストークス方程式に対しては部分段階法を適用した。空間の離散化には二次精度中心差分を、時間の離散化には三次精度ルンゲクッタ法を用いた。MPIとスレ

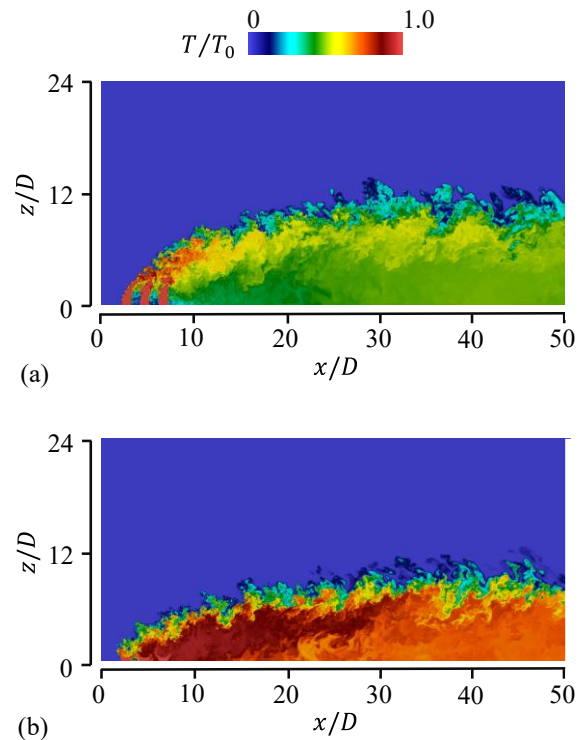


図1 温度分布 (a) $Sw = 0$ (b) $Sw = 0.6$

ッド並列を併用したハイブリッド並列計算を実施した。

3. 計算結果

図1に $Sw = 0$ および 0.6 における温度分布を示す。主流温度 T_∞ との差 T を、噴流と主流の温度差 $T_0 = T_j - T_\infty$ で無次元化した。可視化平面は噴流中心を通る xz 平面であり、 $z = 0$ において高温噴流が三つ見られる。噴出流体は主流によって x 方向に移流する。旋回を伴わない $Sw = 0$ では、各噴流が上昇したのちに合流し、下流へと流れる。一方、 $Sw = 0.6$ では、旋回による噴流の崩壊により壁面付近に高温流体が滞留する。下流域における噴流最大高さは $Sw = 0$ で $z/D \approx 14$ 、 $Sw = 0.6$ で $z/D \approx 11$ であり、旋回により噴流の上昇が抑えられている。

図2に $Sw = 0$ および 0.6 における速度変動rms値 $u_{rms} = (\langle u^2 \rangle - \langle u \rangle^2)^{1/2}$ の分布を示す。旋回を伴わない場

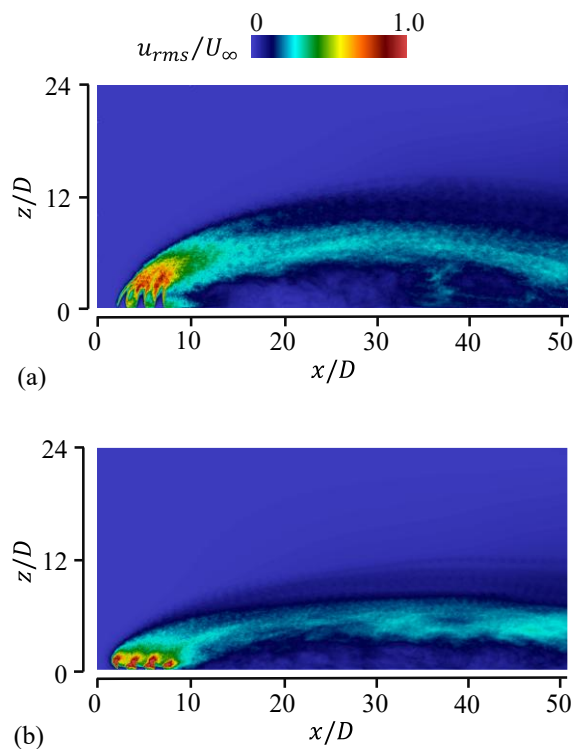


図2 主流方向速度変動の rms 値 (a) $Sw = 0$ (b) $Sw = 0.6$

合、複数噴流が合流する領域で速度変動が大きく、下流に行くにつれて減少する。旋回噴流では、旋回による噴流の崩壊により噴流出口付近で速度変動が増大し、下流域における減少も緩やかとなった。この下流域における増大は、崩壊した噴流が主流を妨げることで噴流下流域に剥離渦や逆流が生じ、強い平均速度せん断が乱れを生成することに起因する。また、逆流領域が上部の高温流体を壁付近へ引き込むことで、図 1(b)に見られた壁面付近の高温領域が形成される。いずれの場合も、壁付近では変動が小さく、強い乱流は上方の噴流内で生じていることが確認された。さらに、旋回の有無によらず、上流域では乱流エネルギー散逸率が非平衡スケーリング則[9]に従い、下流に行くにつれて平衡スケーリング則に近づくことが明らかとなった。

4. 結言

主流中に噴出する旋回噴流を対象に直接数値計算を実施し、旋回が乱流熱拡散に及ぼす影響を調査した。強い旋回による噴流の崩壊が主流を妨げることで剥離渦や逆流が生じ、噴流高さが減少するとともに、高温流体が壁付近に滞留することが明らかとなった。壁付近の速度変動は小さく、活発な乱流は主として噴流内部に存在することが確認された。

また、噴流に類似した大スケールの間欠性を有する乱流塊の直接数値計算を実施し、微細せん断層の崩壊を促進する擾乱付加による熱拡散場の変化を調査した。その

結果、乱流塊外縁に現れる微細せん断層の崩壊により、高温乱流塊と低温の非乱流流体の混合が促進され、乱流塊外縁の平均温度が低下することが示された[4]。同手法を主流中に噴出する旋回噴流へ適用するうえでは、乱流の空間分布およびコルモゴロフスケールの推定が重要となる。具体的には、温度分布と強い速度変動の空間分布が一致しないこと、ならびにコルモゴロフスケールを規定する乱流エネルギー散逸率のスケーリング則が下流方向に変化することが重要であると考えられる。

文献

1. Watanabe, T. & Nagata, K. (2023). The response of small-scale shear layers to perturbations in turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, 963, A31.
2. Watanabe, T. (2024). Enhancement of Passive Scalar Mixing in a Shear-Free Turbulent Front. *Proceedings of the IUTAM Symposium on Turbulent/Non-Turbulent Interface in Turbulent Shear Flows* (pp. 79-93). Springer Nature Switzerland.
3. Watanabe, T. (2024). Efficient enhancement of turbulent entrainment by small-scale shear instability. *Journal of Fluid Mechanics*, 988, A20.
4. Watanabe, T., & Nagata, K. (2025). Influences of small-scale shear instability on passive-scalar mixing in a shear-free turbulent front. *Journal of Fluid Mechanics*, 1008, A20.
5. Watanabe, T., Nishizaki, T., Furuta, T., & Nagata, K. (2025). Direct numerical simulations of multiple swirling jets issued into a crossflow. *Physics of Fluids*, 37(8), 085215.
6. Denev, J. A., Fröhlich, J., & Bockhorn, H. (2009). Large eddy simulation of a swirling transverse jet into a crossflow with investigation of scalar transport, *Physics of Fluids*, 21(1), 015101.
7. Watanabe, T., Sakai, Y., Nagata, K., Ito, Y., & Hayase, T. (2014). Enstrophy and passive scalar transport near the turbulent/non-turbulent interface in a turbulent planar jet flow. *Physics of Fluids*, 26(10), 105103.
8. Katagiri, T., Watanabe, T., & Nagata, K. (2021). Statistical properties of a model of a turbulent patch arising from a breaking internal wave. *Physics of Fluids*, 33(5), 055107.
9. Vassilicos, J. C. (2015). Dissipation in turbulent flows. *Annual review of fluid mechanics*, 47(1), 95-114.