

# 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\*<sup>1</sup>, 長田 孝二\*<sup>1</sup>, 赤尾 拓海\*<sup>1</sup>, 銭 紹祥\*<sup>2</sup>, 胡 希東\*<sup>2,3</sup>, 寺田 崇志\*<sup>4</sup>

\*<sup>1</sup> 京都大学大学院工学研究科, \*<sup>2</sup> 日揮グローバル (株) EN テクノロジーセンター, \*<sup>3</sup> 東京工業大学学術国際情報センター, \*<sup>4</sup> 東京工業大学工学院

キーワード: 乱流, 拡散, 混合, 微細せん断層

## 1. 緒言

乱流による熱や運動量の拡散は環境中の流れにおいて重要な役割を果たす。乱流は様々なスケールの不規則な流体運動を伴い、小スケール流体運動による局所的な速度せん断は層状の領域として表れる[1]。このような微細せん断層は不安定であり、崩壊に伴い管状の渦を生成する。課題責任者らによる近年の研究において、コルモゴロフスケールの約30倍の外乱を乱流に与えることで、層の崩壊による渦生成が促進されることが示された[2]。層の崩壊はその近傍に小スケールの乱流変動を生み出すため、微細せん断層の不安定性は小スケールで生じる熱拡散現象に関連する可能性がある。ここでは、せん断層の不安定性を利用した熱拡散促進の実現可能性を明らかにするために実施した乱流の擾乱応答に関する数値実験の結果について報告する[3]。

## 2. 無せん断乱流塊の直接数値計算

平均速度せん断の無い局所的な乱流塊による熱拡散に対する直接数値計算を実施した[3]。初期条件は一様等方性乱流を静止流体中に埋め込むことで生成する(図1)。乱流領域は周囲の非乱流流体を取り込むことで空間的に発達する。支配方程式は非圧縮性流れのナビエ・ストークス式と熱拡散方程式である。計算領域サイズは $L^3$ である。一様等方性乱流の速度場を $\mathbf{u}_{HT}$ とし、以下の関数 $C(y)$ を用いて初期速度場を $C\mathbf{u}_{HT}$ を求める。

$$C = 0.5 + 0.5 \tanh \left[ \frac{4}{\Delta_l} \left( 1 - \frac{2|y - L/2|}{L_T} \right) \right]$$

ここで、 $\Delta_l$ は乱流と非乱流領域の境界幅、 $L_T$ は乱流領域の厚さである。コルモゴロフスケール $\eta$ と計算領域サイズ $L$ を用いて、 $\Delta_l = 10\eta$ および $L_T = L/3$ とした。乱流および非乱流領域の初期温度を $T_1$ および $T_2$  ( $T_1 > T_2$ ) とし、温度の初期分布を以下の式により与えた。

$$T = \frac{T_1 + T_2}{2} + \frac{T_1 - T_2}{2} \tanh \left[ \frac{4}{\Delta_l} \left( 1 - \frac{2|y - L/2|}{L_T} \right) \right]$$

無次元温度を $\phi = (T - T_2)/(T_1 - T_2)$ とし、 $\phi$ の輸送方程式を解くことで温度場を解析した。また、計算には文献1

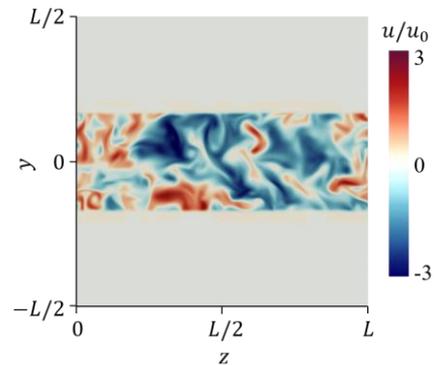


図1 初期x方向速度分布

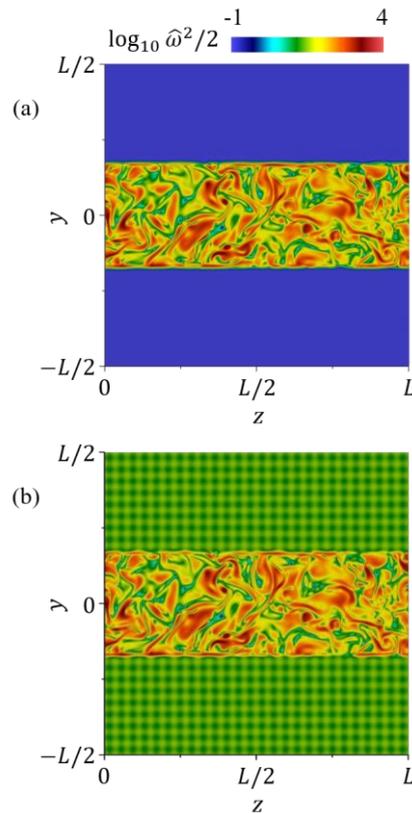


図2 エンストロフィの初期分布 (a) 擾乱無し (b) 擾乱あり ( $\lambda_f = 30\eta$ ) (エンストロフィは乱流内の積分スケール $L_l$ および速度変動 rms 値 $u_{rms}$ で無次元化)

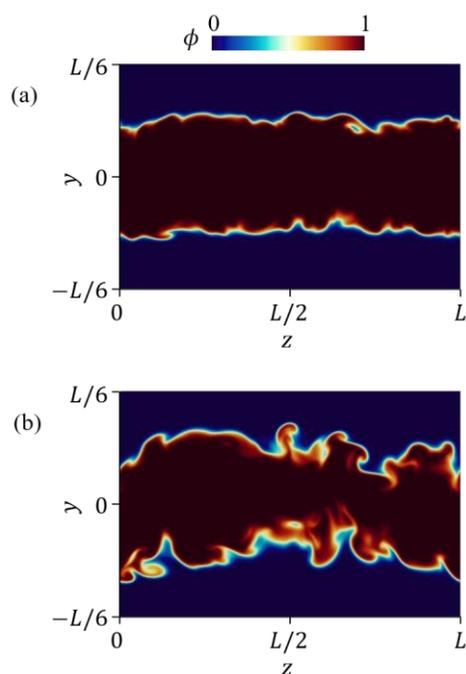


図3 (a)  $t/\tau_\eta = 2$ および(b)  $t/\tau_\eta = 6$ における温度分布  $\tau_\eta$ の初期値で無次元化)

の一様等方性乱流場のデータベースを用いた[1]。テイラーのマイクロスケール基準のレイノルズ数  $Re_\lambda$  は 43~296であり、最大で4096<sup>3</sup>点の計算格子を用いた。いずれの条件においてもプラントル数を1とした。一様等方性乱流のコルモゴロフ時間スケールを  $\tau_\eta$  とし、 $10\tau_\eta$  まで時間進行した。ここでは、 $Re_\lambda = 72$ の条件に対する結果を報告する。

直接数値計算には有限差分法に基づくコードを用いた[1]。ナビエ・ストークス式に対しては部分段階法を適用した。空間の離散化には四次精度中心差分を、時間の離散化には三次精度ルンゲクッタ法を用いた。MPIと自動並列機能によるハイブリッド並列計算を実施した。

微細せん断層を不安定化させる擾乱による熱拡散場の変化を明らかにするため、乱流外部には以下の擾乱を加えた。

$$\mathbf{u}_p = \left[ u_f \sin\left(\frac{2\pi y}{\lambda_f}\right), u_f \sin\left(\frac{2\pi z}{\lambda_f}\right), u_f \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda_f}\right) \right]$$

擾乱の振幅はコルモゴロフ速度  $u_\eta$  を用いて  $u_f = 1.4u_\eta$  とした。また、擾乱波長を  $\lambda_f = 30\eta$  あるいは  $140\eta$  とした。また比較のため、各レイノルズ数について、擾乱有・無の条件で解析を行った。図2にエンストロフィ  $\omega^2/2$  の初期分布を示す ( $\omega = |\nabla \times \mathbf{u}|$ )。乱流外部には擾乱による規則的なエンストロフィの変動が見られる。

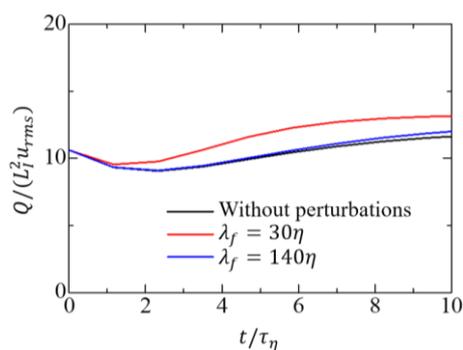


図4 温度混合層の発達率  $Q$  の時間変化 (積分スケール  $L_1$ , 速度変動 rms 値  $u_{rms}$  およびコルモゴロフ時間スケール  $\tau_\eta$  の初期値で無次元化)

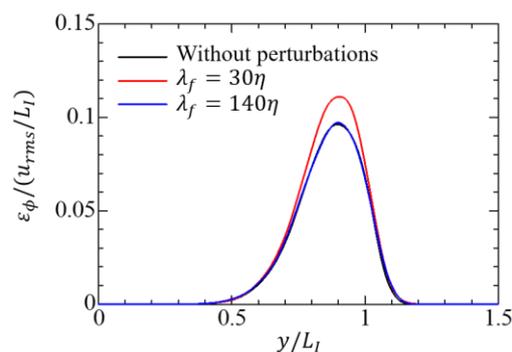


図5 温度変動の散逸率  $\varepsilon_\phi$  の擾乱による変化 ( $t/\tau_\eta = 4.7$ )

### 3. 計算結果

図3に無次元温度  $\phi$  の時間発展を示す。時間とともに乱流が周囲流を巻き込むことで、 $0 < \phi < 1$  となる温度混合層が発達する。温度混合層の外縁を  $\phi = 0.04$  となる温度等値面により定義する。等値面の伝播速度  $v_p$  を等値面上で積分することで温度混合層の発達率  $Q$  を評価する。等値面の伝播速度や面積分の評価には等値面積密度を用いた手法を適用した[4, 5]。

図4に  $Q$  の時間変化を示す。微細せん断層を不安定化させる擾乱 ( $\lambda_f = 30\eta$ ) を与えることで  $Q$  が増加し、温度混合層の発達が促進されることがわかる。擾乱波長に寄らず同じ擾乱振幅を用いているが、この効果は大きいスケールの擾乱 ( $\lambda_f = 140\eta$ ) には見られなかった。小スケールの微細せん断層の不安定性が乱流による周囲流の巻き込みを促進し、それによって温度混合層が速く発達したと考えられる。

図5に温度変動の散逸率  $\varepsilon_\phi = \langle D\nabla\phi \cdot \nabla\phi \rangle$  の  $y$  方向分布を示す ( $D$ : 拡散係数)。微細せん断層を不安定化させる擾乱 ( $\lambda_f = 30\eta$ ) により温度変動の散逸率が増加し、小スケールの熱拡散が促進されていることがわかる。より大きいスケールの擾乱は温度変動の散逸率に影響をほとんど及ぼさない。このように、乱流領域の外部に導入する擾乱の影響は波長が微細せん断層の不安定のスケールと一致するときに顕著に現れることが確認された。

#### 4. 結言

熱拡散を伴う局所的な乱流塊の擾乱応答を明らかにするための数値解析を実施した。微細せん断層を不安定化させる擾乱を乱流塊外部に加えることで、温度混合層の発達や温度変動の散逸率が増加することが確認された。本手法は小スケールの擾乱により乱流拡散を促進する技術として有用であり、環境中などの大規模流れへの応用が期待できる。

#### 文献

- [1] Watanabe, T., Tanaka, K., & Nagata, K. (2020). Characteristics of shearing motions in incompressible isotropic turbulence. *Physical Review Fluids*, 5(7), 072601.
- [2] Watanabe, T. & Nagata, K. (2023). The response of small-scale shear layers to perturbations in turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, 963, A31.
- [3] 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.
- [4] Blakeley, B. C., Olson, B. J., & Riley, J. J. (2022). Self-similarity of scalar isosurface area density in a temporal mixing layer. *Journal of Fluid Mechanics*, 951, A44.
- [5] Watanabe, T. (2024). Efficient enhancement of turbulent entrainment by small-scale shear instability. *Journal of Fluid Mechanics*, 988, A20.