

## 圧縮性乱流中のせん断不安定性による衝撃波生成

研究代表者：渡邊智昭（名古屋大学大学院 工学研究科 フライト総合工学教育研究センター）

速度変動が音速と同じオーダーとなる圧縮性乱流では、乱流の速度変動に起因する衝撃波が現れる。衝撃波による速度変動の増幅や温度・密度の変化により乱流特性が衝撃波前後で大きく変化するため、乱流内の衝撃波の発生は乱流全体の特性に大きな影響を及ぼす。本研究では、乱流中で衝撃波が生成される機構を明らかにすることを目的として、圧縮性乱流の直接数値計算や衝撃波生成に関わると予想される乱流内部の強いせん断領域の解析を実施した。

速度変動の標準偏差と音速の比として定義される乱流マッハ数 $M_T$ が大きい場合、乱流運動が衝撃波を生成することが知られている。乱流マッハ数の大きい圧縮性一様等方性乱流の直接数値計算を実施するため、圧縮性ナビエ・ストークス方程式を数値的に解く計算コードを新たに開発した。六次精度中心差分および五次精度 WENO-AUSM（WENO: Weighted Essentially Non-Oscillatory scheme; AUSM: Advection Upstream Splitting Method）法のハイブリッドスキームを空間の離散化に用いた。時間積分には三次精度 TVD ルンゲクッタ法を用いた。また、中心差分法による数値振動を防ぐため、十次精度のローパスフィルタを適用した。統計的に定常な一様等方性乱流の数値計算には、人工的な外力項をナビエ・ストークス方程式に加える手法が用いられる。圧縮性一様等方性乱流の数値計算で頻繁に用いられる線形加振法は、速度変動 rms 値の大きな時間変動を引き起こすことが知られている。乱流マッハ数は速度変動 rms 値により定義されるため、線形加振法により維持される一様等方性乱流（図 1a）では乱流マッハ数が時間的に大きく変動する。そのため、従来の線形加振法を用いた場合、乱流マッハ数と乱流特性を関連付けた解析を行うことが困難である。本研究では乱流マッハ数の変動を抑えた新たな線形加振法を提案した [1]。本手法では、乱流運動エネルギーの空間平均値と定常状態の値（パラメータとして設定）の比で定義される係数を外力項に付加することで乱流マッハ数の時間振動を低減する。図 1(b)に乱流マッハ数の時間変化を示す。従来の手法では時間平均値の 10%程度の振動が見られるものの、外力項の係数を適切に調整することで乱流マッハ数の振動を抑制できることが確認された。

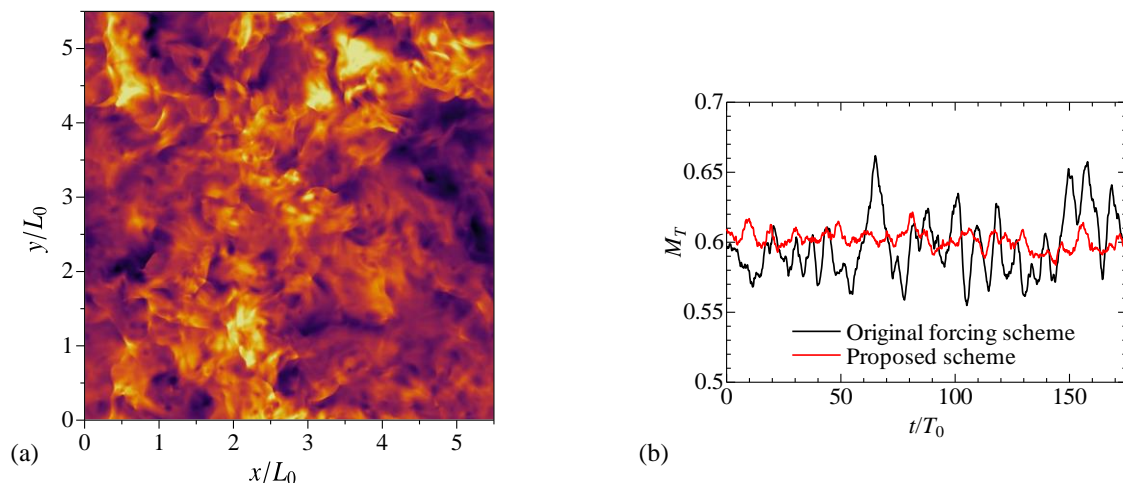


図 1(a) 圧縮性一様等方性乱流中の密度分布; (b) 乱流マッハ数の時間変化 [1].

( $L_0$ : 積分長さスケール;  $T_0$ : 積分時間スケール)

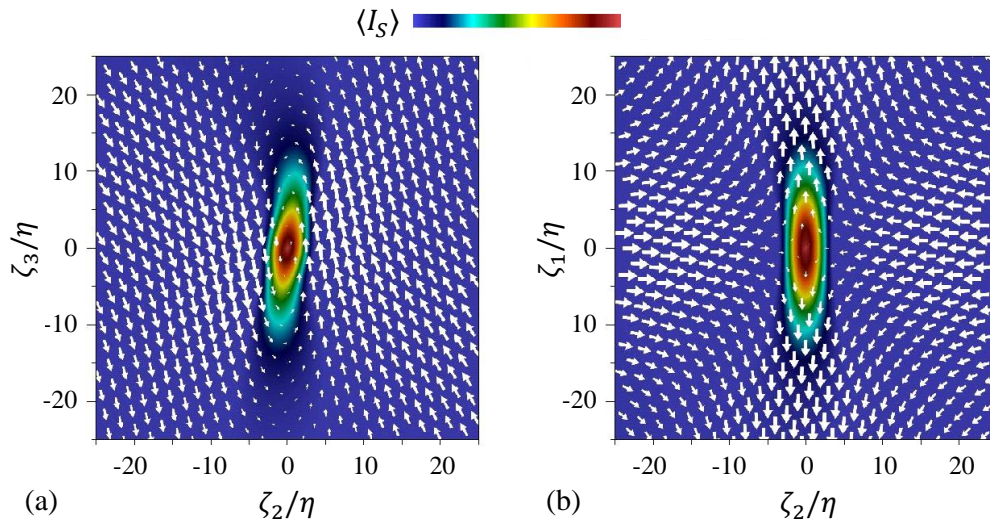


図 2 せん断層近傍の平均速度ベクトルと平均せん断強さ $\langle I_S \rangle$ : (a)  $\zeta_2\zeta_3$ 平面; (b)  $\zeta_1\zeta_2$ 平面 [2].  
せん断座標 $\zeta_i$ はコルモゴロフの長さスケール $\eta$ で無次元化されている.

乱流内のせん断運動に対する平均速度せん断の影響を明らかにするため、乱流平面噴流の直接数値計算を行った[2]. 速度勾配テンソルに対して三成分分解[3]を適用し、せん断運動を表すテンソル $\nabla u_S$ を抽出する. せん断運動の局所的な強さを $I_S = \sqrt{2(\nabla u_S)_{ij}(\nabla u_S)_{ij}}$ と定義し、強いせん断運動を伴う領域を乱流噴流から抽出した. 一様等方性乱流などと同様に、強いせん断を伴う層状領域が噴流内部に見られた. 各せん断層の向きを $\nabla u_S$ の成分から求め、せん断層の向きを表すせん断座標 $(\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3)$ において平均速度場を計算した (図 2). その結果、乱流噴流内のせん断層が二軸歪み領域に形成されていることが明らかとなった. 異なるレイノルズ数を持つ噴流の解析により、せん断層近傍の速度変化や層の大きさがコルモゴロフの長さスケールに関連することが示された. また、せん断層の向きは平均速度せん断の影響をほとんど受けず、せん断層が平均速度ではなく、乱流の速度変動に起因することが明らかとなった. これらの解析結果は一様等方性乱流中のせん断層特性[4]とよく一致しており、乱流内のせん断層構造が平均速度せん断に依存しない普遍的な構造であることが示された.

- [1] Watanabe, T., Tanaka, K., & Nagata, K. (2021). Solenoidal linear forcing for compressible, statistically steady, homogeneous isotropic turbulence with reduced turbulent Mach number oscillation. *Physics of Fluids*, 33(9), 095108.
- [2] Hayashi, M., Watanabe, T., & Nagata, K. (2021). Characteristics of small-scale shear layers in a temporally evolving turbulent planar jet. *Journal of Fluid Mechanics*, 920, A38.
- [3] Nagata, R., Watanabe, T., Nagata, K., & da Silva, C. B. (2020). Triple decomposition of velocity gradient tensor in homogeneous isotropic turbulence. *Computers & Fluids*, 198, 104389.
- [4] Watanabe, T., Tanaka, K., & Nagata, K. (2020). Characteristics of shearing motions in incompressible isotropic turbulence. *Physical Review Fluids*, 5, 072601.