

# 圧縮性乱流中のせん断不安定性による衝撃波生成

第13回JHPCN拠点シンポジウム

渡邊 智昭, 長田 孝二, 赤尾 拓海  
名古屋大学大学院 工学研究科 航空宇宙工学専攻



## 研究概要

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圧縮による温度・密度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、乱流内の衝撃波の生成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圧縮性乱流の直接数値計算により調査する。乱流の三次元速度分布からせん断の強さを定量的に評価することで、圧縮性乱流の内部に現れる局所的なせん断不安定性を引き起こす領域を検出し、せん断不安定性が乱流内部の衝撃波を生み出す機構を明らかにする。

## 圧縮性一様等方性乱流の直接数値計算

・支配方程式: Navier-Stokes方程式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0; \quad \frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + f_i$$

$$\frac{\partial \rho T}{\partial t} + \frac{\partial \rho T u_j}{\partial x_j} = -(\gamma - 1)P \frac{\partial u_j}{\partial x_j} + \frac{\gamma}{RePr} \frac{\partial}{\partial x_j} \left( k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \frac{\gamma - 1}{Re} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + f_e$$

$$P = \rho T; \quad \tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right)$$

・計算方法[1]

八次精度中心差分, 四次精度Runge-Kutta法, 線形加振法

・計算条件

レイノルズ数:  $Re_{L_0} = \rho_0 L_0 u_{rms} / \mu_0$

乱流マッハ数:  $M_{T_0} = \sqrt{3} u_{rms} / a_0$

$L_0$ : 積分スケール  $u_{rms}$ : 速度変動rms値

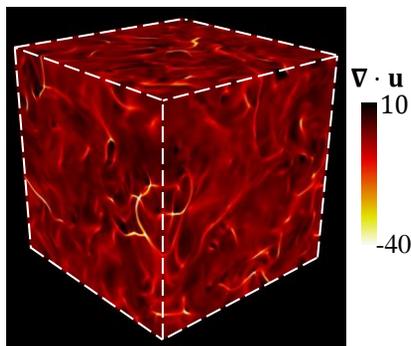
$\rho_0$ : 平均密度  $\mu_0$ : 平均粘性係数

$a_0$ : 平均音速

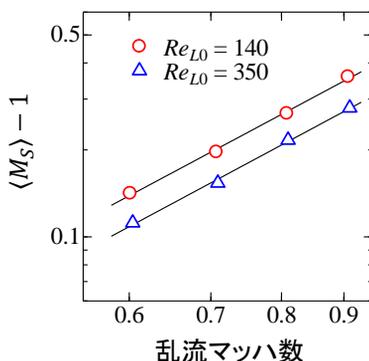
$Re_{L_0} = 140, 350; M_{T_0} = 0.6, 0.7, 0.8, 0.9$

## 乱流により生成される衝撃波

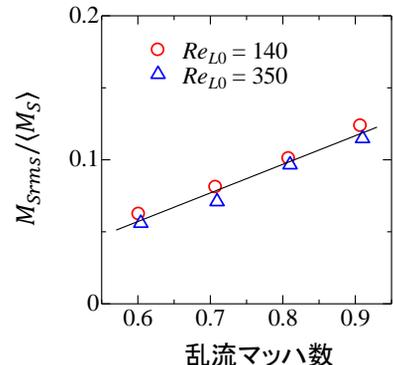
衝撃波 ( $\nabla \cdot \mathbf{u} \ll 0$ ) の可視化



平均衝撃波マッハ数  $\langle M_S \rangle$

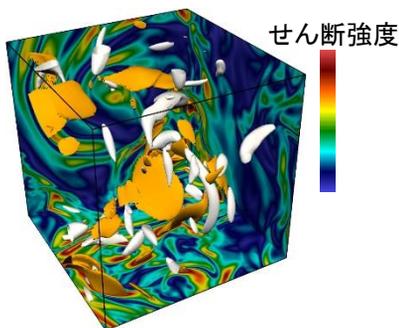


衝撃波マッハ数変動rms値  $M_{Srms}$

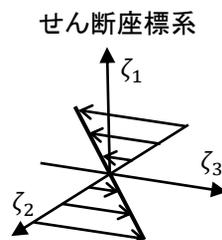
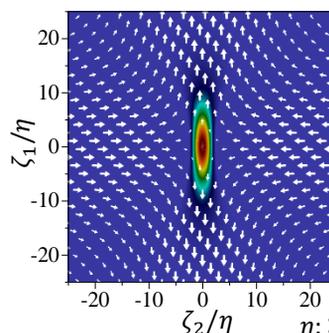
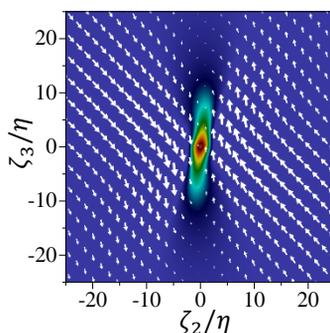


## Triple Decomposition[2]により抽出されるせん断層構造 (非圧縮性乱流)

せん断層 (橙色) と渦管 (白色) の可視化



せん断層近傍の速度分布 (せん断座標系)



$\eta$ : コルモゴロフスケール

[1] Y. Tai, T. Watanabe, and K. Nagata, Modeling of molecular diffusion and thermal conduction with multi-particle interaction in compressible turbulence, Physics of Fluids, Vol. 30, 035108 (2018)  
[2] R. Nagata, T. Watanabe, K. Nagata, and C. B. da Silva, Triple decomposition of velocity gradient tensor in homogeneous isotropic turbulence, Computers & Fluids, Vol. 198, 104389 (2020)