

## 乱流による衝撃波特性変化機構の解明

研究代表者：渡邊智昭（名古屋大学大学院 工学研究科 航空宇宙工学専攻）

衝撃波と乱流の干渉は超音速旅客機の飛行時に生じるソニックブームの伝播などの工学分野において見られる。衝撃波特性は乱流場による速度や温度変動により大きく変化することが実験により示されてきた。本研究では層流から乱流内へと伝播する平面衝撃波の数値計算を行い、乱流との干渉による衝撃波特性の変化について調査した。支配方程式は質量保存、運動量保存、エネルギー保存の式であり、これらを有限差分法により数値的に解く。時間積分には四次精度 Runge-Kutta 法を用いた。空間の離散化には、衝撃波近傍に WENO 法で五次精度化した Roe 法を用いた。一様等方性乱流の数値計算結果を静止流体中に埋め込み、平面衝撃波前後の物理量分布を乱流外に与えることで初期条件を図 1(a)のように生成した。時間とともに衝撃波が  $x$  方向に伝播し、衝撃波と乱流の干渉が生じる。乱流マッハ数  $M_T$  および衝撃波マッハ数  $M_s$  を  $(M_s, M_t) = (1.3, 0.13), (1.3, 0.063), (1.3, 0.011), (1.1, 0.011), (1.01, 0.011)$  とする 5 つの条件に対して数値計算を実施した（乱流レイノルズ数は約 60）。図 1(b)には衝撃波が乱流内に位置する時刻での  $x$  方向速度分布が可視化されている。衝撃波内で速度が不連続的に変化する。乱流との干渉により衝撃波の変形が生じている。衝撃波の局所位置を圧力勾配の分布から検出し、衝撃波位置の変動を用いて衝撃波の変形を調査した。図 2 は衝撃波位置の変動 rms 値  $x'_{s,rms}$  と  $M_t^2/(M_s^2 - 1)$  の関係を示す。衝撃波位置の変動 rms 値が  $M_t^2/(M_s^2 - 1)$  のべき乗で増加することがわかる。最小二乗法により  $x'_{s,rms}/\eta = A[M_t^2/(M_s^2 - 1)]^{0.46}$  が得られた。この指数は、衝撃波による圧力增加の変動 rms 値と  $M_t^2/(M_s^2 - 1)$  の関係に対して実験・数値計算により得られた指数とよく一致する[1,2]。衝撃波の変形は衝撃波マッハ数の変動を引き起こすため[1]、衝撃波位置と圧力増加の変動 rms 値に対して同様のべき乗則が成立したと説明できる。

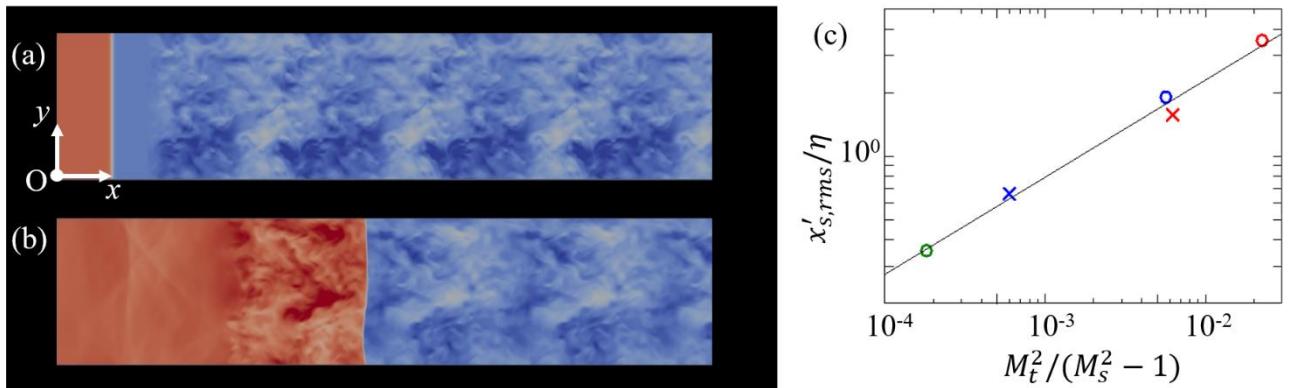


図 1 乱流中を伝播する衝撃波の可視化 ( $x$  方向速度分布)：(a) 初期条件、(b) 乱流中の衝撃波。 (c) 衝撃波位置の変動 rms 値 (Kolmogorov スケール  $\eta$  で無次元化) の  $M_t^2/(M_s^2 - 1)$  に対する変化。

[1] Inokuma, K., Watanabe, T., Nagata, K., & Sakai, Y. (2019). Statistics of overpressure fluctuations behind a weak shock wave interacting with turbulence. *Physics of Fluids*, 31(8), 085119.

[2] Tanaka, K., Watanabe, T., Nagata, K., Sasoh, A., Sakai, Y., & Hayase, T. (2018). Amplification and attenuation of shock wave strength caused by homogeneous isotropic turbulence. *Physics of Fluids*, 30(3), 035105.