

# 壁面噴流内における乱流熱伝達構造と特性に関する DNS 解析

DNS study on structures and characteristics of turbulent heat transfer in plane wall jet

- 古川達也, 名古屋工業大学大学院, 名古屋市昭和区御器所町  
服部博文, E-mail : hattori@nitech.ac.jp  
保浦知也, 田川正人, 名古屋工業大学  
T. Furukawa, H. Hattori, T. Houra and M. Tagawa  
Department of Electrical and Mechanical Engineering,  
Nagoya Institute of Technology, Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya 466-8555

The objective of this study is to investigate and observe structure and characteristics of heat transfer phenomena in wall jet turbulent flow by means of direct numerical simulation (DNS). As for the thermal field, since the wall is heated by an iso-thermal or an iso-heat flux boundary conditions from the inlet of wall jet, an entrance region of thermal field is formed. Thus, distributions of Nusselt number in the entrance region of thermal field are clearly shown by DNS, in which it is clearly observed that the thermal boundary layer of the iso-thermal wall condition rapidly develops as compared with that of the iso-heat flux wall condition. Developments of wall-normal turbulent heat fluxes in the entrance region of thermal field are also revealed by 4 quadrant analysis and visualization of instantaneous thermal streak structure.

## 1. 緒言

乱流を伴う熱伝達現象の中でも、スリットやノズル等から流出した流体が固体壁面に沿って流れる噴流を用いた熱伝達現象は壁面噴流熱伝達と呼ばれ、高温タービン翼の膜冷却や自動車のデフロスター装置など、工業的な伝熱の分野で幅広く利用されている。その流動特性および熱伝達特性を明らかにすることは工学的にも重要である。壁面噴流については、これまでに最大速度が減衰しないポテンシャルコアと呼ばれる初期領域と、内層と外層の両せん断層が交わり、最大速度が減衰していく発達領域とに分けられることが知られている<sup>(1, 2)</sup>。したがって、熱伝達現象も両領域で異なる可能性がある。一方で、乱流境界層における乱流伝熱現象については、直接数値シミュレーション (Direct Numerical Simulation:DNS) を用いて詳細な研究がなされている<sup>(3)</sup>。DNSによって、実験では不可能な壁面近傍における速度場および温度場の乱流統計量が得られ、様々な乱流場における流れおよび熱伝達現象の特性や構造が明らかにされてきた。

そこで本研究では、完全発達した並行平板間乱流として噴出された壁面噴流が、加熱された壁面上で発達する壁面噴流温度助走区間の乱流熱伝達現象を DNS により解析し、その基本統計量や乱流熱伝達構造について調べることを目的とする。

## 2. 計算手法

DNS で用いる支配方程式は、連続の式と非圧縮性を仮定した運動方程式 (Navier-Stokes 方程式), およびエネルギー式である<sup>(4)</sup>。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Re_b} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u_j \frac{\partial \theta}{\partial x_j} = \frac{1}{Pr Re_b} \frac{\partial^2 \theta}{\partial x_j \partial x_j} \quad (3)$$

ここで  $u_i$  は  $x_i$  方向の無次元速度成分,  $\theta$  は無次元温度,  $p$  は無次元圧力である。また  $t$  は無次元時間で,  $x_i$  は  $i$  方向の無次元空間座標である。レイノルズ数は、代表長さとして噴流口の全幅  $D$  を、代表速度は噴流口のバルク速度  $U_b$  として,  $Re_b = U_b D / \nu = 5670$  としている。温度については、等温壁条件では流入温度と壁温の差  $\Delta\theta (= \Theta_w - \Theta_{in})$  を用い,  $\theta = (\Theta_w - \theta) / \Delta\theta$  として無次元化し、等熱流束壁条件では噴流口の全幅  $D$ 、壁面熱流束  $q_w$  と熱伝導率  $\lambda$  を用い,  $\theta = (\theta - \Theta_{in}) / (q_w D / \lambda)$  として無次元化している。プラントル数 ( $Pr = \nu / \alpha$ ) は、作動流体に空気を想定して 0.71 とした。

図 1 に計算対象場の概略図および領域を示す。主計算部に、ドライバー部で生成された一様温度の完全発達乱流を流入させ、ドライバー流入部から距離  $0.5D$  まで同様なチャネル流路として、距離  $0.5D$  の地点を噴出口  $x/D = 0$  とした。その下流からは等温壁条件 (Iso Thermal Wall; ITW) および等熱流束壁条件 (Iso heat Flux Wall; IFW)

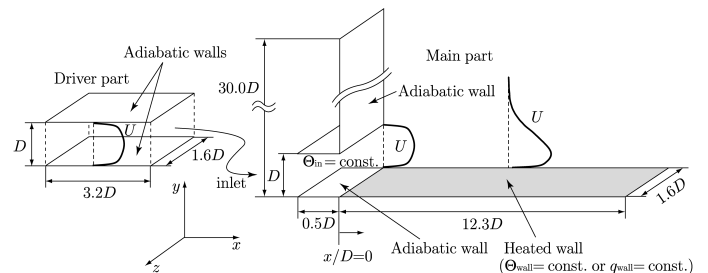


Fig. 1: Schematic and domain of flow field

で加熱した。速度場境界条件はドライバー部，主計算部ともに壁面においてすべり無し条件，スパン方向には周期境界条件を設定した。また，主計算部では，上方境界条件に自由すべり条件，速度場，温度場共に流出条件として対流流出条件を設定した<sup>(4)</sup>。

DNS の計算格子はスタガード格子を用い， $y$  方向は不等間隔格子として，その格子点数は要求される格子解像度を満たすように，主計算部で各方向にそれぞれ  $x \times y \times z = 512 \times 352 \times 128$  点を配置して約 2300 万点，ドライバー部は  $x \times y \times z = 128 \times 96 \times 128$  点の約 160 万点とした。計算スキームは，微分の離散化に対して微分整合性を考慮した有限差分法を用い，時間発展の離散化には，対流項には Adams-Bashforth 法，粘性項には Crank-Nicolson 法，空間離散には 2 次精度中心差分法，連続の式と圧力場のカップリングには Fractional step 法を用いて計算を行っている<sup>(4)</sup>。

### 3. 結果と考察

図 2 に局所ヌセルト数分布を示す。両条件共に温度助走区間の経験式とよく一致しているが，ITW は IFW よりヌセルト数の減少が早い。これは ITW の方が温度境界層の発達早いことを意味しており，図 3 の温度分布からも明らかである。図 4 に示すように，内層での壁面垂直方向乱流熱流束の大小に起因するものと考えられる。

図 5 と図 7 に，垂直方向乱流熱流束の 4 象限解析結果を示す。噴流の初期領域，発達領域，およびそれらの中間の遷移領域のいずれにおいても，壁面から  $y^+ = 15$  付近までは第 4 象限 ( $v > 0, u < 0$ ; sweep) の寄与が大きく， $y^+ = 15$  以上からは第 2 象限 ( $v < 0, u > 0$ ; ejection) の寄与が卓越している。また，異なる壁面加熱条件においても同様の傾向となった。この結果は，阿部ら<sup>(5)</sup>の並行平板間乱流における DNS の結果，および Kong ら<sup>(6)</sup>の平板乱流境界層における DNS の結果とよく一致している。図 6，図 8 は各条件における温度場の瞬時構造を可視化したものである。4 象限解析で確認したように，温度ストリークは平板乱流境界層と類似したものになっていることが確認できる。

### 4. 結言

本研究では壁面噴流場における温度助走区間の DNS を行い，以下の結論を得た。

- (1) 温度場統計量では，温度助走区間における局所ヌセルト数は壁面加熱条件によってその減少率が変わり，壁面垂直方向乱流熱流束の大きさによることを確認した。
- (2) 垂直方向乱流熱流束の 4 象限解析では，おおむね

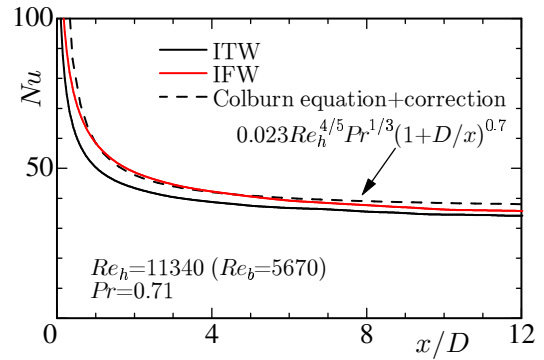


Fig. 2: Local Nusselt numbers in both wall conditions

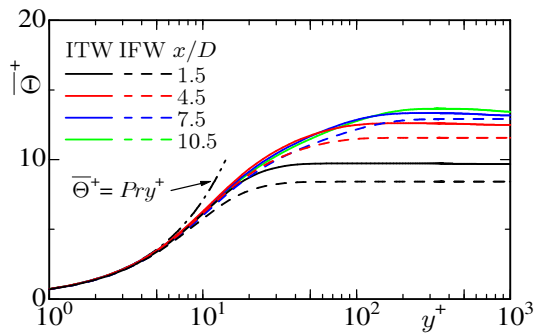
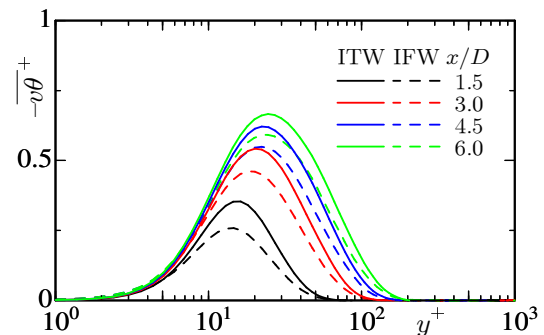
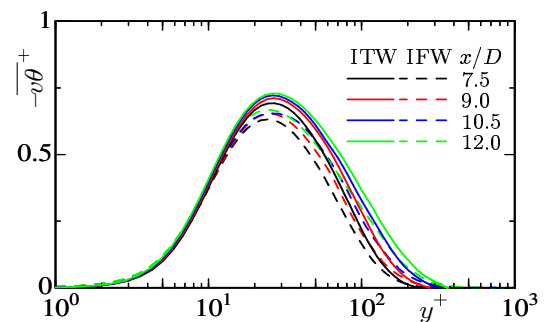


Fig. 3: Profiles of mean temperature



(a)  $x/D = 1.5 \sim 6$  (Potential core and transit regions)



(b)  $x/D = 7.5 \sim 12$  (Development region)

Fig. 4: Profiles of wall-normal turbulent heat fluxes

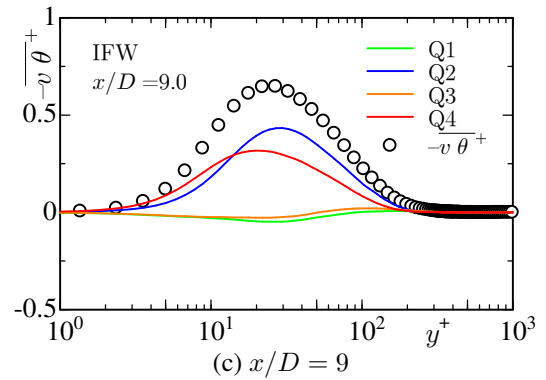
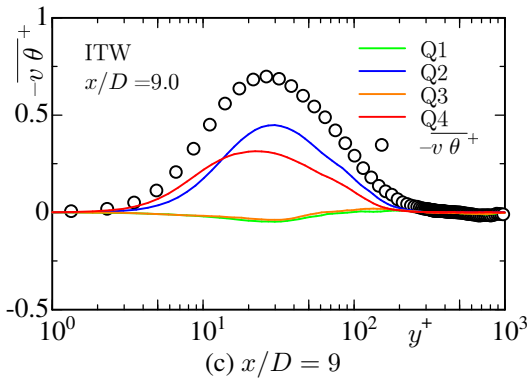
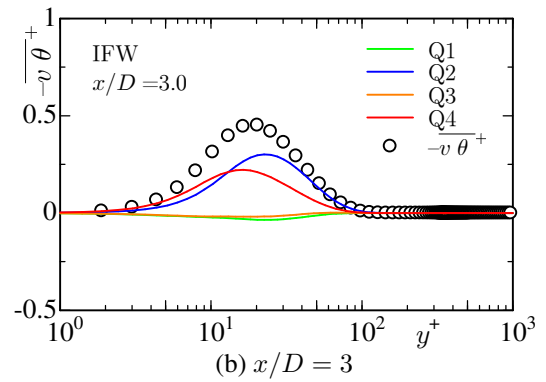
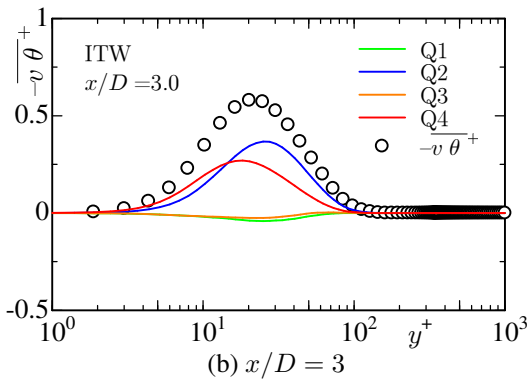
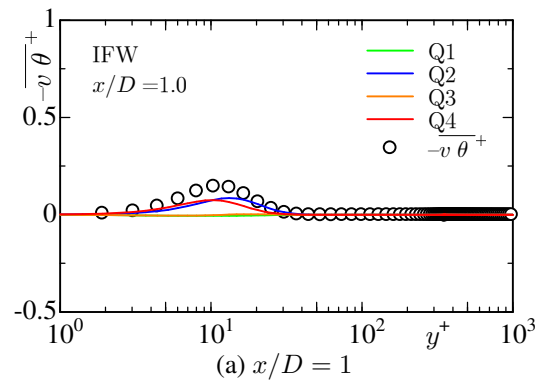
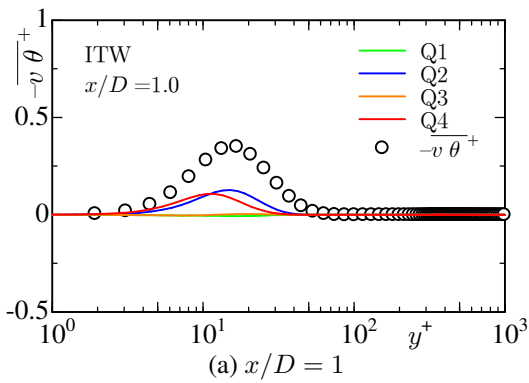


Fig. 5: Four quadrant analysis for wall-normal turbulent heat flux in case of ITW

Fig. 7: Four quadrant analysis for wall-normal turbulent heat flux in case of IFW

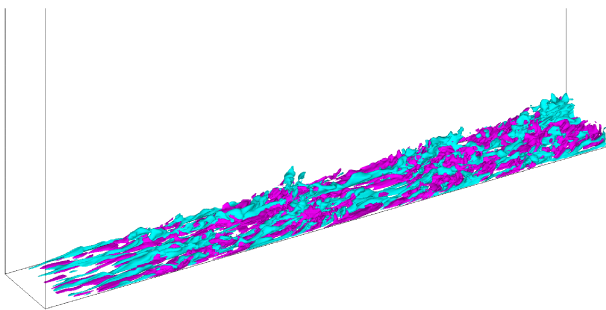


Fig. 6: Thermal streaky structure in case of ITW (magenta:  $\theta > 0.1$ , cyan:  $\theta < 0.1$ )

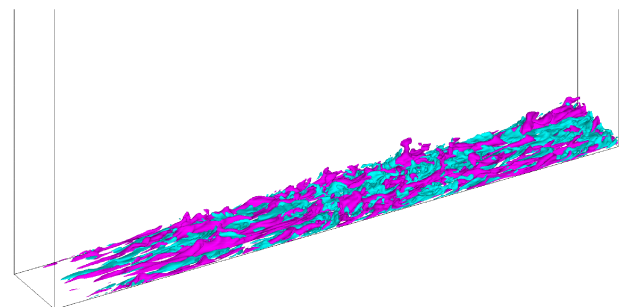


Fig. 8: Thermal streaky structure in case of IFW (magenta:  $\theta > 0.01$ , cyan:  $\theta < 0.01$ )

$y^+ < 15$  では sweep が,  $y^+ > 15$  では ejection が支配的であることを確認した。

(3) 瞬時構造では, 壁面加熱条件にかかわらず温度ストリークは平板境界層と類似したものになることが分

かった。これは、壁面噴流の境界層領域における温度境界層の発達を見ているためと思われる。

#### 謝辞

本研究は、総合科学技術・イノベーション会議の SIP (戦略的イノベーション創造プログラム)【高効率ガソリンエンジンのためのスーパーリーンバーン研究開発】(管理法人: JST) と、JSPS 科研費 17K06195 の助成を受けた。ここに記して謝意を表す。

#### 参考文献

- (1) G.E. Myers, J.J. Schauer, and R.H. Eustis. *ASME Journal of Basic Engineering*, Vol. 85, pp. 47–53, 1963.
- (2) G. Herbst and P.M. Sforza. *AIAA Journal*, Vol. 8, No. 2, pp. 276–283, 1970.
- (3) H Hattori, T Houra, A Kono, and S Yoshikawa. *Journal of Energy Resources Technology*, Vol. 139, No. 5, p. 051209, 2017.
- (4) H Hattori and Y Nagano. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 25, pp. 749–758, 2004.
- (5) 阿部浩幸, 河村洋. 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 69, No. 686, pp. 2291–2298, 2003.
- (6) H Kong, H Choi, and J S Lee. *Physics of Fluids*, Vol. 12, pp. 2555–2568, 2000.