

DNS による壁面上の噴流乱流熱伝達現象に関する研究

DNS study on turbulent heat transfer phenomena of jet on the wall

○ 古川達也, 名工大院, 名古屋市昭和区御器所町
服部博文, 名工大, E-mail : hattori@nitech.ac.jp
保浦知也, 田川正人, 名工大

T. Furukawa, H.Hattori, T. Houra and M. Tagawa

Nagoya Institute of Technology, Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya 466-8555

The objective of this study is to investigate the structures and characteristics of heat transfer phenomena with two types of turbulent wall jet flows by means of direct numerical simulation (DNS). First, the turbulent wall jet with heat transfer along the wall is carried out by DNS, in which it is revealed that the large turbulent structure in the free shear layer appears in the spanwise region. Thus, the effect of domain size for turbulent statistics are explored, but the turbulent statistics are slightly influenced by the domain size. Next, the turbulent impinging wall jet with heat transfer is conducted, in which it is observed that the thermal boundary layer of the isothermal wall condition rapidly develops as compared with that of the iso-heatflux wall. The second peak of the Nusselt number is more clearly shown in the isothermal wall condition than that in the isoflux wall condition, because of the increase in wall-normal turbulent fluctuation in the region away from the stagnation point.

1. 諸言

スリットやノズル等から流出した流体が固体壁面に沿う、もしくは衝突する噴流を用いた熱伝達現象は、壁面噴流熱伝達現象と呼ばれ、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。そこで、壁面に平行に流れる壁面噴流については、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、壁面近くの境界層と外側の自由せん断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から成ることが知られている^(1, 2)。したがって、熱伝達現象も両領域で異なる可能性があり、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。また、噴流が壁面に垂直に衝突する衝突噴流による熱伝達現象は、よどみ点付近で高い熱伝達率を有するという特徴があるため、金属・化学工業における物質の加熱・冷却・乾燥や、半導体装置の冷却など工業上の幅広い分野で応用されている。この衝突噴流についても、壁面までの衝突距離によって、自由噴流領域、衝突領域および壁面噴流領域などに分けられる複雑な流れ場を形成するため、その熱伝達特性の解明は工学的に重要である。これらは、しばし乱流中内で起こる現象であり、そのために壁面近くや自由せん断層など、急激に現象が変化する領域での観察が必要となる。そのため、実験では計測が難しい壁面近傍等における速度場および温度場の乱流統計量が得られる、直接数値シミュレーション

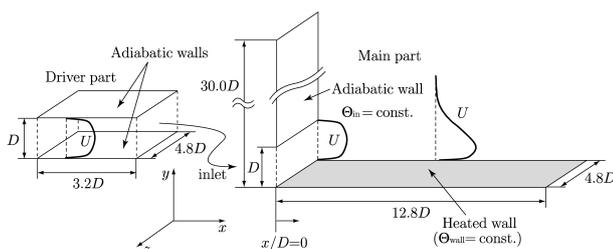


Fig. 1: Schematic and domain of flow field: wall jet

ン (Direct Numerical Simulation:DNS) を用いて、乱流熱伝達熱現象についての詳細な研究がなされ⁽³⁾、様々な乱流熱伝達現象の特性や構造が明らかにされてきた。

本研究では、完全発達した並行平板間乱流から噴出された、壁面噴流および衝突噴流が加熱された壁面上を通過する際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。さらに、壁面噴流では、スパン方向の領域サイズによる乱流構造および統計量への影響も調査する。

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⁽⁴⁾。

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

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

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

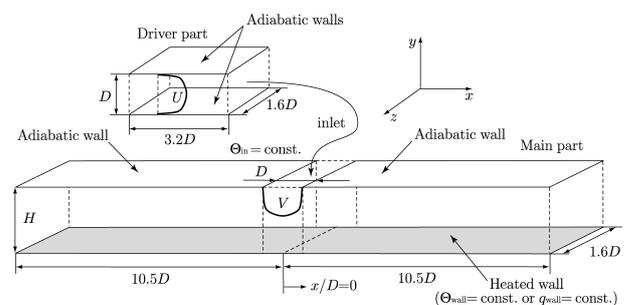


Fig. 2: Schematic and domain of flow field: impinging jet

ここで u_i は x_i 方向の無次元速度成分, θ 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 または V_b として, $Re_b = U_b D / \nu = 5670$ および $Re_b = V_b D / \nu = 4560$ 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 λ 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 に壁面噴流の, 図 2 に衝突噴流の計算対象場の概略図および領域をそれぞれ示す. 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る. 壁面噴流については, 噴出口 $x/D = 0$ から等温壁条件 (Iso Thermal Wall; ITW) で加熱した. 衝突噴流については, 衝突距離 $H = D$ とし, 噴出口の中心を $x/D = 0$ として, 等温壁条件 (Iso Thermal Wall; ITW) および等熱流束壁条件 (Iso heat Flux Wall; IFW) 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, 壁面噴流の上方境界条件に自由すべり条件を, 速度場, 温度場共に流出条件として対流流出条件をそれぞれ設定した⁽⁴⁾.

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した. 壁面噴流の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, 衝突噴流の主計算部で各方向にそれぞれ $x \times y \times z = 320 \times 96 \times 96$ 点を配置して約 300 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⁽⁴⁾.

3. 結果と考察

3.1 壁面噴流

図 3 に, 主流方向平均速度分布および最大速度の 2 分の 1 の速度をとる y 方向高さである半値幅 $b_{1/2}$ の分布を示す. スパン領域の影響を確認するために, 領域長さを 3 分の 1 の $z/D = 1.6$ とした場合の結果も共に示す. 噴流の内層および外層の速度分布と半値幅は両条件でほぼ一致しており, 噴流の壁面垂直方向の発達に対するスパンの影響は小さいと言える. なお, 半値幅の勾配は 0.0344 で, Schwarz ら⁽⁵⁾の結果 ($b_{1/2} = 0.0678(x + 11.2)$) より小さい値となっている. スパン方向領域サイズの影響を詳しく見るために, 主流方向速度変動のスパン方向二点相関の分布を図 4 に示す. スパンが小さいと, 二点相関の値が 0 に落ちる距離が短くなっていることが分かる. 図 5 に速度場の瞬時構造の可視化画像を示す. スパン方向領域サイズによって外層のストリーク様構造の幅が異

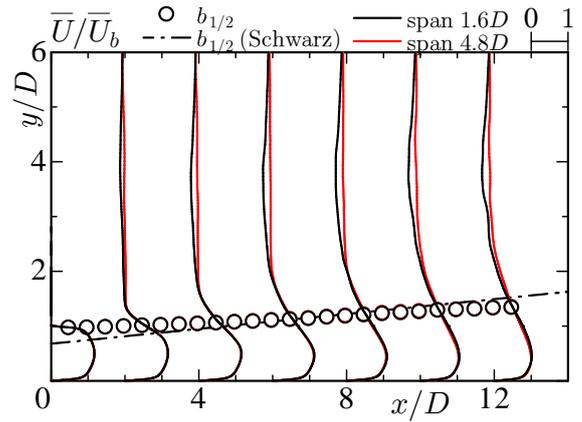


Fig. 3: Profiles of streamwise mean velocity

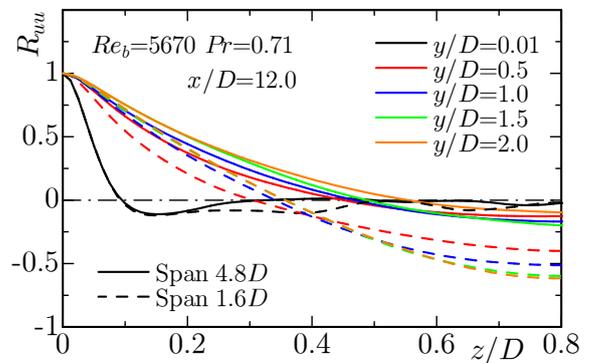
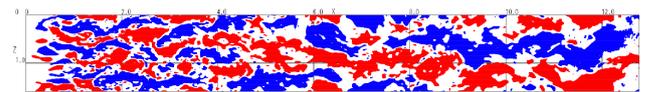
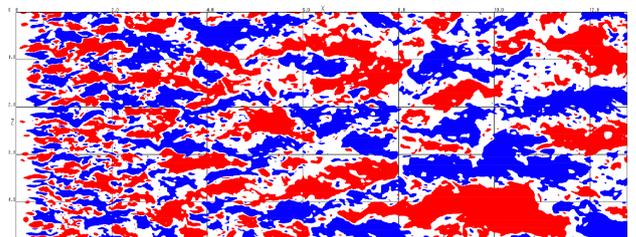


Fig. 4: Profiles of two-points correlation of streamwise velocity fluctuation



(a) $z/D = 1.6$



(b) $z/D = 4.8$

Fig. 5: Streaky structures of velocity field at $y/D = 1.0$ (red: $u > 0.1$, blue: $u < 0.1$)

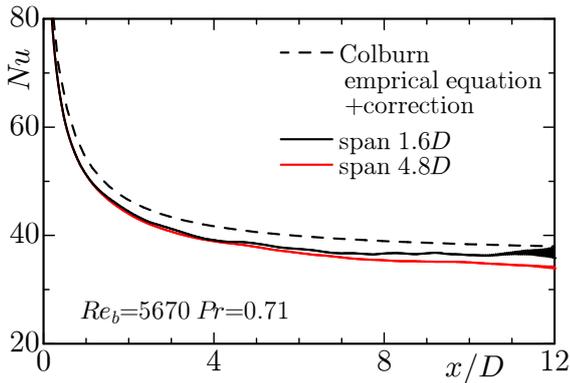


Fig. 6: Distributions of local Nusselt number (wall jet)

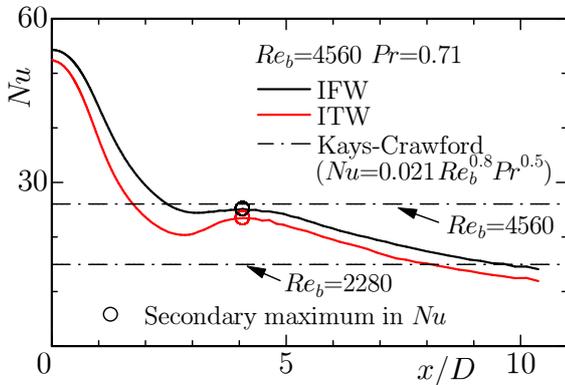


Fig. 7: Distributions of local Nusselt number (impinging jet)

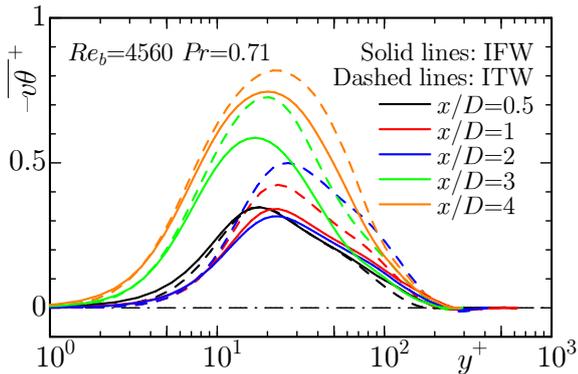


Fig. 8: Profiles of wall-normal turbulent heat flux

なることが見て取れ、これは二点相関の結果と一致している。次に温度場統計量として図 6 に局所ヌセルト数 Nu の分布を示す。両条件共に温度助走区間の経験式⁽⁶⁾とよく一致しているが、スパン領域が大きいほうがヌセルト数の減少が早い。これはスパンが大きいほうが温度境

界層の発達ที่早いことを意味している。

3.2 壁面衝突噴流

図 7 に局所ヌセルト数分布を示す。ITW は IFW よりヌセルト数の減少が早く、ITW の方が温度境界層の発達が早いことが分かる。また、ヌセルト数の第 2 極大値⁽⁴⁾ についても、ITW の方が明瞭に現れる結果となった。これは、図 8 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。

4. 結言

本研究では壁面噴流場および衝突噴流における温度助走区間の DNS を行い、以下の結論を得た。

- (1) 壁面噴流の速度場では、スパン方向領域の大きさによる噴流の発達への影響は見られなかった。速度場の瞬時構造では、スパンの拡大に伴い外層の構造が大型化することが分かった。このことは二点相関からも確認できた。
- (2) 壁面噴流の温度場統計量では、温度助走区間における温度境界層の発達はスパン方向領域の大きさによってその早さが変わることを確認した。
- (3) 衝突噴流の温度場統計量では、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。また、ヌセルト数の第 2 極大値にも壁面加熱条件による影響が現れることを確認した。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 17K06195 と、2019 年度に実施した自動車用内燃機関技術研究組合との共同研究事業の成果です。関係者各位に深く感謝の意を表します。

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) W.H. Schwarz and W.P. Cosart. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 10, No. 4, pp. 481–495, 1961.
- (6) A.P. Colburn. *Trans. AIChE*, Vol. 29, pp. 174–210, 1933.