二次元オフセット噴流の流れの可視化と熱伝達

Flow Visualization and Heat Transfer of Two-dimensional Offset Jet Flow

○ 小川洋平 (千葉工大院) 田村 渥 (千葉工大院)
 正 佐野正利 (千葉工大)

Yohei OGAWA, Chiba Institute of Technology, 2-17-1, Tsudanuma, Narashino, Chiba
 Atsushi TAMURA, Chiba Institute of Technology, 2-17-1, Tsudanuma, Narashino, Chiba
 Masatoshi SANO, Chiba Institute of Technology, 2-17-1, Tsudanuma, Narashino, Chiba

Heat transfer and pressure characteristics of two-dimension offset jet of fully developed flow were investigated experimentally. Flow visualization for the same flows was carried out using the high speed camera. The Reynolds number Re was changed in 1.5×10^3 to 7.0×10^3 , and the offset ratio H/h was changed in 0.5, 1.0 and 1.5. The result shows that rolling up vortices appear downstream of the reattachment point. Two peaks exist at the Nusselt number distribution of the laminar flows with $H/h=0.5$ and 1.0. The 1st peak appears near the reattachment point of a jet flow, and 2nd peak appears in the neighborhood which vortices eject from the wall.

Key Words: Two-Dimensional Offset Jet, Offset Ratio, Flow Visualization, Heat Transfer

1. 緒言

噴流出口近傍に噴流の軸と平行に段差のある壁面が存在する場合には、噴流はコアンダ効果によって壁面に向かって湾曲し、壁面に再付着して流れる。このようなオフセット噴流は、工場や生活排水、ガスタービンの燃焼室など多くの応用があり、省エネルギーや環境問題に関して重要な流れである。オフセット噴流に関しては、これまでに多くの研究が行われている⁽¹⁾⁽²⁾。しかしながら、再付着点近傍の流れ場は逆流を伴う非常に複雑な流れとなるため、流れの詳細や伝熱特性に関しては不明の点が多く残されている。特に、噴流出口の流れが層流となるような低レイノルズ数領域まで含めて熱流動特性を解析した例はあまり存在しない。著者らは、既報⁽³⁾において、噴流出口の流れが十分発達した二次元オフセット噴流に着目し、レイノルズ数を広範囲に変化させた条件のもとでオフセット噴流の圧力特性と熱伝達特性を実験的に調査した結果について報告した。本報では、高速度カメラを用いて流れ場を可視化し、流動特性と熱伝達との関係について調査する。

2. 実験装置および実験方法

本研究で使用した実験装置の概要と座標系を図1に示す。噴流出口での流路形状は、流路幅が250mm、流路高さ h が6mmの矩形断面であり、十分な流れの二次元性を確保している。風洞から噴流出口に至る長さ L は流れを十分発達させるために2000mmとしている。噴流に至るまでの流路ならびに付着壁面はアクリル板からなり、それらの壁面には多数の静圧孔が設けられている。座標系はステップからの流れ方向距離を X 、ステップ下端からの垂直方向距離を Y とする。なお、オフセット比 H/h (H : ステップ高さ) は0.5, 1.0, 1.5の3種類、レイノルズ数 Re ($=U_m d_e/\nu$, U_m : 断面平均速度, d_e : 水力直径, ν : 動粘度) は1.5, 2.0, 2.5, 3.5, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0×10^3 の8種類に変化させる。

Fig.1 Experimental apparatus and coordinate system

噴流出口に至る流れの状態を明確にするために、噴流出口上流の流路における管摩擦係数 λ を次式から求める。

$$\lambda = \frac{4p}{\rho U_m^2 / 2} \cdot \frac{d_e}{L_x} \quad \text{-----(1)}$$

(Δp : $X = -600$ と $X = -100$ mm 間の壁面静圧差,
 L_x : Δp を測定した区間長さ)

測定された壁面静圧 p は、次式で定義される壁面静圧係数 C_p により整理する。

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\rho U_m^2 / 2} \quad \text{-----(2)}$$

(p : 壁面静圧, p_∞ : 大気圧)

伝熱実験にあたっては、図1に示した付着壁面を厚さ30 μ mのステンレス箔を接着した厚さ20mm、長さ1500mmのペークライト板に取り替え、この板を熱流束一定の条件のもとで加熱することにより局所熱伝達率 α を式(3)から求める。なお、 α は式(4)に定義される局所ヌセルト数 Nu により整理する。

$$\alpha = \frac{q}{T_w - T_j} \quad \text{-----(3)}$$

(T_w : 伝熱面温度, T_j : 噴流出口温度, q : 熱流束)

$$Nu = \frac{\alpha d_e}{k} \quad \text{-----(4)}$$

(k : 空気の熱伝導率)

流れの可視化にあたっては高速度カメラを用いる。撮影にあたり光源としては5Wの出力をもつNd:YAGレーザ(日本レーザ製: DPGL-5W)を使用し、流れに混入するトレーサ粒子は、煙発生装置(KANOMAX製: MODEL 8304)により生成する。撮影にはデジタルハイスピードカメラ(nac製: HX-3)を用い、解像度は2560 $\times$ 1024pixel、撮影速度は3500fps、シャッタースピードは1/10000秒である。

3. 実験結果および考察

図2に噴流出口上流の流路における管摩擦係数 λ の測定結果を示す。赤の実線は矩形管の層流に対して成立する理論式⁽⁴⁾であり、青の実線はブラジウスの式である。測定結果は遷移域を除いてこれらの式と良好な一致を示しており、噴流出口に至る流れが十分発達しているものと考えられる。また、図2より、噴流出口に至る流れは $Re=1.5 \times 10^3 \sim 3.0 \times 10^3$ では層流、 $Re=3.5 \times 10^3 \sim 5.0 \times 10^3$ では遷移、 $Re=6.0 \times 10^3 \sim 7.0 \times 10^3$ では乱流になっているものと判断できる。

Fig.2 Pipe friction coefficient

図 3 に 3 種類のオフセット比 H/h に対して, Re による壁面静圧係数 C_p の流れ方向変化を示す. いずれの H/h においても噴流出口に近い位置にピークが見られる. ピークが現れる位置は, 噴流出口の流れが層流から乱流に変化することによって上流側に移動する. これは, 噴流出口の流れが乱流となることにより, 噴流の混合・拡散が活発になるためと考えられる. また, 層流あるいは乱流と判断できる範囲では, Re の相違によらずほぼ同様な分布形状を示す. なお, $Re=5.0 \times 10^3$ の噴流出口の流れは遷移域にあるが, 乱流に近い分布形状となる. これは, 噴出直後の噴流が早期に乱流に遷移するためと考えられる. $H/h=0.5, 1.0$ の噴流出口の流れが層流と判断される条件においては, 最初のピークに比較すると明瞭ではないものの, 2 番目のピークの存在が認められる. なお, $X/h=20$ よりも下流側ではオフセット比や Re の相違にかかわらず C_p の値はほぼ零となる. これは, 噴流出口から離れた領域では, 噴流の拡散が大きくなるためである.

Fig.3 Wall static pressure coefficient

図 4 に 3 種類のオフセット比 H/h に対して, Re による Nu の流れ方向変化を示す. いずれの H/h に対しても Re の影響は噴流出口付近に顕著に現れ, 流れが層流における Nu の値は小さく, 乱流では非常に大きくなっている. なお, C_p の測定結果と同様に $Re=5.0 \times 10^3$ の噴流出口の流れは遷移域に相当するが, 乱流の分布形状に類似している.

Fig.4 Local Nusselt number

図 5 に噴流出口に至る流れが層流の場合である $Re=2.0 \times 10^3$ の $H/h=0.5, 1.0, 1.5$ に対する可視化画像, Nu および C_p の流れ方向変化を示す. なお, 画像中の赤の三角印 $\blacktriangle$ は, 粒子画像測定法(PIV)を用いて測定された時間平均の再付着点である⁽⁵⁾. 再付着点は H/h が大きくなるにつれて下流側に移動するが, この位置は C_p および Nu 分布に最大値が現れる位置とほぼ一致している. 熱伝達の促進に再付着流れが大きな寄与をしていることがわかる. 付着後の流れには, 壁面から離れた静止流体側で反時計方向, 壁面側で時計方向に回転する 2 種類の渦が形成される. $H/h=0.5$ ではこの渦は $X/H=15$ 付近から現れ, $X/H=20$ 付近で壁面から離れる方向に移動して明瞭な渦は観察されなくなる. なお, 形成された 1 対の渦が壁面から離れる現象をここではバーストと呼ぶこととする. $H/h=1.0$ では同様の現象が $X/H=12$ 付近から現れ, $X/H=20$ 付近にバーストが見られる. バーストが発生する位置と Nu に 2 番目のピークが現れる位置とはほぼ一致している. したがって, バーストによって壁面側的高温流体が壁面から離れる方向に移動し, 熱交換が活性化されるものと思われる. 一方, $H/h=1.5$ の場合には, Nu 分布に 2 番目のピークは観察されない. これは, 可視化画像から明らかのように, この条件では再付着点とバーストの発生する位置とが接近しているためと考えられる.

図 6 に噴流出口に至る流れが遷移領域に相当する $Re=3.5$

$\times 10^3$ の結果を示す。この条件においては可視化画像からは明瞭ではないが、いずれのオフセット比においても間欠的に $Re=2.0 \times 10^3$ で見られような渦の形成とバーストが観察された。そのため、 Nu 分布は $Re=2.0 \times 10^3$ の結果と比較的類似したものになったものと思われる。

図 7 に噴出口に至る流れが乱流である $Re=7.0 \times 10^3$ の結果を示す。この場合には再付着位置と Nu , C_p 分布に最大値が

現れる位置とはほぼ完全に一致する。最大値が現れた後の下流方向への変化については、 Nu は単調に減少してしだいに一定値へと漸近していく、 C_p はしばらくすると大気圧と等しくなる。オフセット比に関しては、 H/h の増加につれて、 Nu , C_p ともに最大値の現れる位置が下流側に移動するものの、最大となる位置での値はオフセット比が相違しても、ほとんど変化しない。

Fig.5 Flow visualization, local Nusselt number and wall static pressure coefficient for $Re=2.0 \times 10^3$

Fig.6 Flow visualization, local Nusselt number and wall static pressure coefficient for $Re=3.5 \times 10^3$

Fig.7 Flow visualization, local Nusselt number and wall static pressure coefficient for $Re=7.0 \times 10^3$

図 8 に噴流出口に至る流れが層流の場合である $Re=2.0 \times 10^3$ の $H/h=1.0$ に対する可視化画像を 0.01s 間隔にて示す. 壁面に沿った流れは, 図 8(a)に示すように $X/H=20$ 付近で大きな巻き上がりを起こしてパーストする場合と, 図 8(b)に示すように $X/H=25$ 付近まで比較的スケールの小さい渦が巻き上がりながらパーストする場合とが交互に発生する. 時計方向と反時計方向で回転する 2 種類の渦は, 噴流が壁面に付着し, 壁面噴流が形成された後に壁面と静止流体間に生じるせん断層によって形成されると思われる. なお, これらの渦の挙動が熱輸送や運動量輸送, ならびに圧力分布に及ぼす影響については, 今後, 熱線流速計を用いた速度分布の測定, マイクロフローセンサを用いた壁面せん断応力の測定, 時間的に連続した PIV を用いた測定を行うことにより, 明らかにする予定である.

4. 結論

(1) 噴流出口に至る流れが層流, 遷移の場合では, $H/h=0.5, 1.0$ と比較して $H/h=1.5$ において Nu, Cp の最大値が大きくな

る. これは, 再付着点とパーストの発生位置が接近しているためである.

(2) 噴流に至る流れが乱流の場合では, H/h が増加するにつれて再付着点位置が下流側に移動する. しかしながら, Nu, Cp の最大値は変化しない.

(3) $Re=2.0 \times 10^3$ の $H/h=0.5, 1.0$ で見られる Nu の 2 番目のピークは, パーストにより壁面近傍の流れが壁面から離れる方向に移動し, 熱輸送が活性化されることによって形成される.

(4) 可視化結果に見られる時計方向と反時計方向の渦は, 壁面と静止流体間に生じるせん断層によって形成される.

引用文献

- (1) Nasr, A. and Lai, J. C. S., Exp. in Fluids, 24 (1998), 47-57.
- (2) Heung, B.S., et al., Int. J. Heat Transfer, 43(2000), 2395-2404.
- (3) 田村渥・佐野正利, 機講論, No.130-1(2013), 403-404.
- (4) 日本機械学会編, 管路・ダクトの流体抵抗(1979), 37-50.
- (5) 田村渥, オフセット噴流の熱流動特性 (2012), 千葉工業大学大学院修士論文.

Fig.8 Flame advance at an interval of 0.01s for $H/h=1.0$ at $Re=2.0 \times 10^3$