C243 長円形衝突噴流の温度分布の可視化

琉球大学 松田昇一[○], 屋我実, 親川兼勇

Visualization of Isotherms on Impinging Plate with Elliptic Jet

Shoichi MATSUDA*, Minoru YAGA* and Kenyu OYAKAWA*

The time and spatial temperature profiles on the impingement plate were measured by using an infrared radiometer with a two-dimensional array of Indium-Antimony (In Sb) sensors for various nozzle exit-to-plate separations, when the jet being issued from an elliptic nozzle impinges to the target plate. The isotherms of infrared images, as well as the heat transfer coefficients were obtained by the measurement data. To compare the isotherms and the heat transfer contours with flow pattern, the flow on the plate was also visualized by the oil-film method. It was found that the phenomena of axes switching, which is caused by the differences in the self-induced velocity in the non-circular vortices, was observed and the heat transfer characteristics well corresponds to the flow patterns.

1. 緒言

衝突噴流による物体の冷却・加熱は噴流の岐点近傍で大きな局所値を有することから広く利用されている。特に非円形噴流は噴流の混合促進などの工学的応用が注目され、その諸特性が実験的に検討されている。例えば長円形噴流などについては Husain ら¹⁾、豊田ら²⁾によってその渦構造が明らかにされている。しかしこれらは自由噴流とした場合の流動特性をあつかっており、物体に衝突させた場合の衝突噴流の流動および物体表面上の熱伝達特性は含んでない。非円形の衝突熱伝達特性は Oyakawa ら³⁾によって報告されているがきわめて少ない。そこで本研究では、長円形噴流を下流の平板に衝突させた場合の衝突熱伝達特性が噴口と平板の距離に対してどのように変化するかを赤外線映像装置により衝突平板全面の温度分布を瞬時に測定することによって調べた。また衝突平板上の熱電対による熱伝達率の測定、油膜法による可視化および流れ場の測定も行い、これらの結果を対比させることによって熱伝達特性を明らかにする。

2. 実験装置および方法

実験装置の概略図および噴口形状、温度分布測定用の赤外線カメラの配置を図1に示す。作動流体は空気で噴流速度 $U_0 = 10\text{m/s}$ とした。噴口形状は短軸長さ $L = 6\text{mm}$ 、長軸長さ $3L = 18\text{mm}$ 、相当直径 $D = 10\text{mm}$ の長円形オリフィス型噴口を使用する。座標系は噴口から衝突平板までの距離を X 、衝突平板から垂直方向の距離を Z 、噴流中心軸から長軸方向(Major)を r_v 、短軸方向(Minor)を r_h とした。赤外線映像装置は瞬時に衝突平板全面の温度分布を映すものである。なお温度分解能は 0.025°C である。この赤外線映像のデータをもとにして局所熱伝達率 $hx = q/(t_w - t_f)$ を算出した。ここで q は熱流束、 t_w は衝突板の温度、 t_f は主流温度である。衝突平板部の詳細は前報⁴⁾と同じ。また赤外線映像装置による実験結果との比較のために以下の実験を噴口寸法を $3/2$ に拡大し、噴流噴口出口速度を $U_0 = 20\text{m/s}$ として行った。さらに熱電対による衝突平板上の等熱伝達率分布の測定、油膜法による衝突平板上の流れの可視化、熱線風速計を用いて衝突平板近傍の速度および乱れ強さの測定を行った。なおレイノルズ数は $Re = 0.9 \times 10^4 \sim 1.6 \times 10^4$ の範囲である。

Fig.1 Experimental apparatus

3. 実験結果および考察

3.1 赤外線映像による等温度分布図

長円などの非円形噴流の渦構造は自己誘導速度がその曲率半径に反比例することより三次元変形を受け、曲率の大きい長軸側が短軸側の前方かつ噴流中心部に移動する。その結果長径は減少し、短径が増加し長短軸が入れ替わる (axes switching)²⁾。そこで長円形オリフィス型噴口による衝突平板上の温度分布を赤外線映像装置を用いて、噴口の相当直径 D と噴口と衝突平板間距離 X との比 X/D を変化させて測定した。その結果を $X/D = 0.25 \sim 6$ について図2(a)~(h)に示す。図中の白っぽい領域は低温領域を表しており、数字は温度($^\circ\text{C}$)を示す。なお長軸方向は r_v と長軸長さ $3L$ との比 $r_v/3L$ 、短軸方向は r_h と短軸長さ L との比 r_h/L にとった。これにより $r_v/3L = \pm 0.5$ 、 $r_h/L = \pm 0.5$ がそれぞれ長軸方向と短軸方向の噴口端に当たる。まず $X/D = 0.25$ では、中心付近に噴流が衝突したこん跡を示す噴口形状と同じ縦に細長い低温領域が存在

*University of the Ryukyus, Senbaru 1, Nishihara, Okinawa 903-01

する。外縁部の等温度分布は長短軸方向に広がりを見せており十字形の形状を示しているが、短軸方向への広がりが大きい。これは前述の自己誘導速度が曲率半径に反比例するためと考えられる。長軸方向の広がりはとくに噴口と衝突平板間距離が小さいときに生じており、これは噴口板の影響だと思われる。 $X/D=0.5$ は $X/D=0.25$ と同様に中心付近に縦長の低温度域が見られる。外縁部の等温度分布は長短軸へ広がりを示しているが、長軸方向の広がりは小さくなっている。これは噴口板の影響が小さくなったからであろう。 $X/D=1$ では中心付近に縦長の低温度域が見られるが、 $r_H/L=0$, $r_V/3L=-0.4$ 付近に最も温度の低い領域が存在する。外縁部の等温度分布は長軸方向に縮まり、短軸方向に広がって横に細長い分布となる。また長軸方向の広がりは他の X/D に比べて最も小さく噴口板の影響はほとんど見られない。 $X/D=1.5, 2$ では中心よりむしろ $r_H/L=0$, $r_V/3L=\pm 0.4$ 付近に低温度域が存在する。このように X/D の小さい範囲では低温度域が二極化する傾向がある。外縁部の形状は長短軸方向に広がりを示しており横長の楕円の形状を示している。 $X/D=2.5, 3$ では $X/D=1.5, 2$ に見られた二つの低温度域は合体して一つの縦長の形状を示す。また $X/D=3$ における中心付近の低温度域は $X/D=2.5$ と比べると長軸方向に縮まった形状を示す。外縁部の分布の形状は長短軸方向に一樣な広がりを示しており円に近い形状となる。 $X/D=6$ となると中心付近の低温度域は長短軸が入れ替わり、外縁部とともに円に近い分布となる。ここでは示していないが $X/D=6$ 以降では、中心部、外縁部ともに円形の分布を示す。

3.2 熱伝達率特性

赤外線映像装置によるデータをもとにして長短軸方向の局所熱伝達率 hx を算出した。図2の半径方向の変化の様子をより詳細に知るために、 X/D の変化による長軸方向と短軸方向の hx の分布を図3(a), (b)にそれぞれ示す。長軸方向において $X/D \leq 3$ では岐点 $r_V/3L=0$ よりむしろ $r_V/3L=\pm 0.5$ 付近にピークが見られる。これは長軸側の噴口端に当たり、速度の加速効果および噴口端から流出した渦による乱れの影響と考えられる。 X/D の増加に伴い $r_V/3L=\pm 0.5$ 付近のピークは中心部へ移動し $X/D=6$ 以降では $r_V/3L=0$ に唯一のピークを持つ山なりの分布となる。これは前述した自己誘導速度がその曲率半径に反比例するために曲率の大きい長軸側は噴流が中心かつ前方に移動し、それに伴い噴口から噴出した渦輪⁹⁾の変形によりピーク位置が中心部へ移動することによる。また図2(c), (d), (e)の等温度分布図に見られた $r_V/3L=\pm 0.4$ 付近の低温度域は、図3の局所熱伝達率分布の中心部の凹部が平坦化することにより一つになる。 $X/D=0.25, 0.5$ において $r_V/3L=\pm 1$ 付近で極値が見られる。これは岐点付近の層流境界層が乱流に移移する領域であるために現れたものである⁹⁾。短軸方向において $X/D=0.25$ では噴口端に当たる $r_H/L=\pm 0.5$ 付近にピークが見られるが他の X/D では岐点 $r_H/L=0$ に最も高い値を示している。これは短軸側の曲率が長軸側に比べて小さいので $X/D=0.25$ に見られる噴口端のピークは外縁部へ移動したと考えられる。遷移によるピークは $X/D=0.5, 1, 1.5, 2, 2.5$ にお

Fig.2 Isotherms of infrared images

いて $r_H/L = \pm 2$ 付近で見られる。また $X/D=0.25$ では $r_H/L = \pm 5$ 付近に遷移によるピークが見られる。これは噴口板が $r_H/L=3.3 \sim 3.3$ に位置するためにピークは他の X/D より外縁部に現れると思われる。

3.3 等熱伝達率分布

衝突平板の加熱部裏面に取り付けられた21本の熱電対を用いて等熱伝達率分布を測定した。得られた結果を $X/D=2, 3, 6$ に対して図4(a), (b), (c)にそれぞれ示す。 $X/D=2$ の中心付近の $hx=200[\text{W/m}^2\text{K}]$ 以上の高熱伝達率域は噴口形状と同じく縦に細長い分布となっており図2(e)の低温度域と良く対応している。また $hx=100[\text{W/m}^2\text{K}]$ 以下の低熱伝達率域は長軸方向には縮まり、短軸方向に広がりを見せており等温度分布図の外縁部の形状とよく対応している。 $X/D=3$ では中心付近の $hx=200[\text{W/m}^2\text{K}]$ 以上の高熱伝達率域は $X/D=2$ に比べて僅かに長軸方向の広がりが減少し、外縁部の低熱伝達率域はほぼ円形を示している。 $X/D=6$ において中心付近の高熱伝達率域は長短軸が入れ替わり、短軸方向に細長い長円形の分布となる。外縁部の低熱伝達率域はほぼ円形を示している。なお $X/D=3, X/D=6$ の等熱伝達率分布も図2(g), (h)の等温度分布図の形状と良く対応している。

3.4 油膜法による可視化

油膜法による衝突平板上の流れ場の可視化写真を $X/D=2, 3, 6$ について図5(a), (b), (c)にそれぞれ示す。 $X/D=2$ において図2(e)の等温度分布図、図4(a)の等熱伝達率分布図と同様に中心付近に噴口形状と同じ縦に細長い粒子の残存が見られる。これは中央部で噴流の衝突により縁部の油膜がはがれたために生じる。外縁部でも等温度分布図、等熱伝達率分布図と同様に短軸方向に広がり、長軸方向に縮まった横に細長い形状をしている。 $X/D=3$ において $X/D=2$ の場合と同様な形状を示しているが、中心部の粒子の残粒は僅かに長軸方向に縮まった形状となる。また外縁部は円に近い形状を示している。 $X/D=6$ において中心部の粒子の残粒は長短軸が入れ替わり、僅かに短軸方向に細長い形状を示している。 $X/D=2, 6$ においても分布の形状は等温度分布図、等熱伝達率分布図と良く対応している。

3.5 流動特性

$X/D=3$ の衝突平板の壁面から0.5mm離して、I型の熱線風速計を長軸と短軸方向に沿わせて測定した速度分布と乱れ強さの分布を図6(a), (b)に示す。図中の○は時間平均速度 $\bar{u}$ と噴口

Fig.3 Radial heat transfer coefficient

Fig.4 Iso-heat transfer coefficient contours

Fig.5 Flow patterns

出口速度 U_0 の比 $\bar{u}/U_0$, Δ は乱れ強さ $\sqrt{u'}/U_0$ を表す。なおこの速度 $\bar{u}$ および乱れ $\sqrt{u'}$ は中央部では、半径方向と z 方向成分の合成されたものである。長軸方向において速度分布、乱れ強さの両者とも岐点 $r_v/3L=0$ に極小値を持ち、速度分布は $r_v/3L=0.4$ 付近に、乱れ強さは $r_v/3L=0.8$ 付近で最大値を持つ。また両者とも $r_v/3L$ の増加に伴い減少する。速度分布の $r_v/3L=0.4$ 付近のピークは図3(a)における $X/D=3$ の局所熱伝達率分布のピーク位置に一致しており、流れの加速効果および乱れの増加により熱伝達率が高められたと考えられる。乱れ強さの $r_v/3L=0.8$ 付近のピークは層流から乱流に移る領域に当たるために生じる。局所熱伝達率分布にも $r_v/3L=0.8$ 付近に僅かな極値が見られるが、乱れは大きいものの速度が小さくなるためにさほど熱伝達率は高められない。短軸方向においても長軸方向と同様に速度分布、乱れ強さの両方とも岐点 $r_H/L=0$ に極小値をもつ。また速度分布は $r_H/L=1.6$ 付近に、乱れ強さは $r_H/L=3.1$ 付近で最大値をとり r_H/L の増加に伴い両者とも減少していく。図3(b)における $X/D=3$ の局所熱伝達率分布において、速度分布のピーク位置である $r_H/L=1.6$ 付近、乱れ強さのピーク位置である $r_H/L=3.1$ 付近で僅かながら極値が見られる。

噴流の領域からある距離離れると流れは壁面噴流状態にあると考えられる⁹。 $X/D=3$ の長軸側の乱れ強さのピークである $r_v/3L=0.8$ 、短軸側の乱れ強さのピークである $r_H/L=3.1$ における速度分布と乱れ強さを衝突平板からの距離 z を変化させて測定した。得られた結果を図8(a), (b)にそれぞれ示す。長軸側の $r_v/3L=0.8$ において速度分布、乱れ強さの両者とも壁面近傍に最大値を持ち、 z の増加に伴い減少する。速度分布が示すようにほぼ $z=5\text{mm}$ まで壁噴流として発達し、乱れ強さはそれより幾分離れたところまで顕在している。短軸側の $r_H/L=3.1$ における速度分布は壁面近傍で、乱れ強さは $z=1\text{mm}$ 付近で最大値をとり、両者とも長軸側と同様に z の増加に伴い減少する。壁面噴流の速度分布は $z=7\text{mm}$ 付近まで見られる。長軸と短軸を比較した場合、速度分布の平均的な厚さは短軸の方が大きいように思われる。このことは短軸側へ広がると同時に膨らみもあることを示している。非円形の長円の長・短軸側においても壁面流の様相を示すことが確認された。

4. 結言

非円形の長円形噴口からの噴流による衝突熱伝達特性を赤外線映像装置による等温度分布図、熱電対による等熱伝達率分布、油膜法による可視化および衝突平板近傍の速度、乱れ強さの分布図により検討した。得られた結果は次のとおりである。

- (1) 長円形自由噴流の特性である axes switching 現象が衝突平板上でも見られる。 X/D の増加に伴い等温度分布および等熱伝達率分布の中心部は長軸方向に縮まり、短軸方向に広がる。外縁部では逆の現象がおこる。
- (2) 赤外線映像による等温度分布図と熱電対による等熱伝達率分布図はよく対応しており、等熱伝達率分布の特性が明らかになった。
- (3) 流れの流跡と等温度分布、等熱伝達率線図はよく対応している。 $X/D=2$ では中心付近に縦長の流跡が見られ、低温度域および高熱伝達率域と一致する。外縁部の形状もよく対応している。
- (4) 速度、乱れ強さのピーク位置はそれぞれ局所熱伝達率分布のピーク位置と一致しており、衝突平板近傍の流れが熱伝達におよぼす影響等が明らかになった。

謝辞

本研究は、その一部を笹川科学研究助成、一般科学研究(9-095)により行われたものであることを記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Husain, H. and Hussain, F., Phys. Fluids, 26, No.10, (1983), 2763-2765.
- 2) 豊田国昭, Hussain, F., 機論, 55-514(1989), 1542-1545.
- 3) Oyakawa, K., et al., Proc. of the 4th ASME/JSME Thermal Eng. Joint Conf., (1995), 377-384.
- 4) 松田昇一, 他3名, 衝突噴流熱伝達特性の赤外線映像による解析, 可視化情報, Vol.16, No.2, (1996), 143-146
- 5) Gardon, R. and Akfirat, J. C., Int. Journal Heat Mass Transfer, (1965), 1261-1272.
- 6) ラジャラトナム, N., 噴流, 第1版, 森北出版, (1981), 229-237

Fig.6 Profiles of velocity and turbulence intensity on impingement plate

Fig.7 Profiles of velocity and turbulence intensity