噴出口に大きい端板を付した長方形衝突噴流に関する実験*

土屋良明** 濱 邦彦** 吉永憲市*** 堀越長次**

Impingement of a Rectangular Jet with a Large End Plate at the Exit

Yoshiaki TSUCHIYA, Kunihiko HAMA, Kenichi YOSHINAGA,
Choji HORIKOSHI

A rectangular jet from a long channel with a rectangular exit of an aspect ratio of five was vertically impinged on a flat plate. Taking the impingement distance as the parameter, the pattern of impingement flow, the velocity on the jet centerline and the pressure distribution on the flat plate were examined. Smoke of joss-sticks was used to observe the flow patterns. The pressure on the flat was measured thorough 0.5mm diameter holes on the plate. Impingement distances were within 30 times the length of the short side of the rectangular exit.

The flow patterns on the impingement plate are found to change twice with increasing impingement distance. Some streamlines, not only on the large end plate but also on the impingement plate, form toward the jet exit at distant regions from both axes of the two plates in the case of small impingement distances. In addition, the spread of pressure distributions on the impingement plate is presented for different impingement distances.

1. はじめに

衝突噴流は、とくに流体信号の発生に直接かかわる油空圧工学においてのみならず、工業分野で広く応用されている。たとえばノズル・フラッパー系変位センサーの場合^{1), 2)}あるいは他の噴流による流体力などの利用に際しては、物体との衝突距離が短い場合が多く、流れは噴出口付近の幾何学的形状の影響を受ける。流れの観察結果³⁾より明らかであるこの影響については、Sallipalli⁴⁾による多重噴流に関する報告があるがきわめて少いようである。したがって、最も典型的な噴出口付近の形状として、噴出口に大きい端板を付した

噴流が平板へ衝突する場合の流れの様相を調べることは有意義である。また、かかる端板は噴出流体の広がり規制できるので、工業過程での環境保全の立場からも重要であろう。一方、変位センサーの精度向上⁵⁾あるいは噴流による洗浄、塗装、メッキなどに関連して重要である長方形噴出口からの噴流の衝突については、浜ら³⁾、Kotanskyら⁶⁾による報告があるものの、二次元・軸対称噴流の場合^{7) - 10)}に比べて少く、いまだ十分とは言えない。

本研究では、第一段階として、縦横比5の長方形噴出口からの噴流が比較的大きい平板へ垂直に衝突する場合について、衝突距離が小さい場合にも注目して実験を行った。衝突距離とともに変化する噴出口端板と衝突平板間の流れ様式、衝突平板上の圧力分布などについて調べた結果を報告する。なお、縦横比・形状の自由噴流拡散様式への影響が比較的小さいことが知られ

* 昭和61年1月13日 原稿受付

** 信州大学工学部

*** 信州大学大学院

ている¹¹⁾上流側に長い平行部がある長方形噴出口を用いた。

2. おもな記号

b_y, b_z : $P = P_i/2$ となる衝突平板 y, z 軸上の値

b_{my}, b_{mz} : 自由噴流断面内で $P_i = P_{im}/2$ となる y, z 軸上の値

h : 長方形噴出口短辺の長さ

P : 衝突平板上の圧力の周囲大気圧との差

U : 噴流軸方向速度

w : 長方形噴出口長辺の長さ

x, y, z : 噴出口中心を原点とした座標 (図1)

添字

i : 衝突点における値

m : 噴流中心軸上における値

o : 噴出口における値

t : 総圧

s : 静圧

3. 実験装置および実験方法

実験装置の概要をFig. 1に示す。送風機からの気流は、ハニカム、3枚の金網によって風洞1内で整流されたのち、短辺 $h=10$ mm、長辺 $w=50$ mm (縦横比 $w/h=5$) の長方形管2を通り、端板3と同一面にある噴出口4から噴出し、一辺500 mmの正方形衝突平板 (透明アクリル酸樹脂板) 5へ衝突する。6は衝突平板上の中心線に沿ってあけられた内径0.5 mmの圧力孔である。座標軸は、Fig. 1中に示すように噴出口中心を原点として、 x, y, z 軸とする。3方向に可動な移動装置により衝突平板を動かし、衝突距離あるいは yz 面内での圧力孔の位置を変える。

総圧 P_t は外径0.8 mm、内径0.5 mmのビトー管、あるいは0.8 mm、圧力孔径0.3 mmの円筒型ビトー管により、また、静圧 P_s は外径0.8 mmの管に径0.3 mmの圧力孔が4個ある静圧管により、それぞれ周囲静止空気圧との圧力差として求めた。同様に平板上の圧力 P も求めるが、これらの圧力は、傾斜マノメーターにより測定、あるいは圧力変換器を通してペンレコーダーで記録された。また、衝突平板の外縁付近に置いた線香の煙によって流れを可視化し、端板あるいは衝突平板上の流れを透明な衝突平板を透して下流側から観察した。

噴出速度 U_o は、 $x_i/h=10$ において設定したものであり、したがって衝突平板の影響が噴出口に及ぶ $x_i/h < 3$ では、とくに記さない場合もこの設定値とは異なる。おもに $U_o = 22$ m/s、 U_o と h に基づくレイノルズ数 $Re_o = 13500$ について実験した。なお、衝突距離は

$x_i/h \leq 30$ の範囲である。

Fig. 1 Experimental apparatus

4. 実験結果および考察

4.1 衝突距離と流れ様式

衝突距離 x_i の増大とともに変化する衝突平板外縁付近の流れ方向の線香の煙による観察例をFig. 2に示す。衝突距離が最も小さい $x_i/h = 0.5$ (Fig. 2(a)) では、 y, z 両軸上の付近において流れは外側へ向っている。しかしながら、 $x_i/h = 0.7$ あたりを境にしてわずかに衝突距離が増加した $x_i/h = 1$ では、噴出口長辺に沿う方向である z 軸上でFig. 2(b)に見るように噴出口へ向う流れへと変化する。同様な流れ様式は $x_i/h < 6$ において認められたが、 x_i がさらに大きくなると衝突平板の縁で噴流軸方向へ巻き込む流れが観察された (Fig. 2(c))。 $x_i/h > 18$ ではFig. 2(d)に示すような流れ様式へ変化する。Fig. 2(b)~(d)の各 xz 面の流れの様相を見れば、この面内での流れ様式の変化過程が x_i の増大とともに衝突噴流の xz 面における広がりも大きくなったことに起因していること、また $x_i/h > 20$ でも噴出口端板の影響があることがわかる。

衝突距離が小さい場合に見いだされた流れ様式について、衝突平板と端板間の流れの概略をFig. 3に示す。Fig. 3(a)は y, z 両軸付近での流れが平板の外側へ向うFig. 2(a)の場合であり、Fig. 3(b), (c)は z 軸付近の流れが噴流軸方向となるFig. 2(b)の場合である。線香の煙の浮力の影響がいくぶん認められており、定性的な

観察の域ではあるが、流れの特徴が明確に表わされている。すなわち、流線の間隔を見れば、後述する噴出口付近の負圧領域に起因する巻き込みの影響が強いことが示唆される。また、流線の区別ができなくなる領域の幅に注目すれば、噴出口短辺方向へ流出する流れの噴出口長辺方向へのエントレインメントによる広がりがそう大きくはないことを示している。なお、 $x_1/h = 0.8$ の場合に見られる x 軸付近における流線のわん曲は、その内側に噴出流体があることを示しており、衝突距離 $x_1/h < 1$ における流れ様式の変化過程については、端板の大きさをも考慮したより詳細な検討を今後する必要がある。

Fig. 2 Flow pattern

Fig. 3 Sketch of streamline

4.2 噴流中心軸上の圧力分布

噴流中心軸上の速度 U_m の分布を Fig. 4 に、速度を U_0 で噴出口からの距離 x を h で無次元化して、衝突平板の位置が $x_1/h = 0.5, 1, 5, 10, 20, 30$ の場合について示す。 $x_1/h \geq 5$ においては、二次元・軸対称噴流の場合^{8), 10)}と同様に、速度減衰が著しくなる衝突平板付近の上流側では自由噴流の場合と同様な速度減衰を示している。

Fig. 4 Centerline velocity

上述の速度分布に対応する中心軸上の総圧 P_{tm} および静圧 P_{sm} の分布を、各衝突距離の場合について比較してFig.5に示す。総圧、静圧はともに噴出口総圧 P_0 で、 x は h でそれぞれ無次元化してある。自由噴流の中心軸上総圧分布と比較すれば、衝突平板付近では、 $x_i/h=10, 20$ において明確に認められているように、総圧の減衰が抑制されており、軸対称噴流の場合にTaniら¹⁰⁾によって指摘されているように衝突平板の付近に粘性の影響が少い領域があることを示唆している。また、静圧 P_{sm} の衝突平板付近における増加のあり方は、衝突平板の影響の範囲を明確に示している。とくに、 $x_i/h=0.5, 1$ では噴出口における静圧の上昇が明確であり、このことが、噴出口端板の影響とあいまって、Fig.2(a)の流れ様式からFig.2(b)のそれへの変化をもたらしているものと推定される。なお、図示はしないが、これらの場合には先きに述べた設定値より噴出口総圧も大きくなっている。

Fig. 5 Centerline total- and static-pressures

Fig. 6 Pressure at impingement point

Fig.6には衝突点 x_i の圧力 P_i を、自由噴流の中心軸上総圧 P_{tm} の x 変化と比較して示した。噴出口付近では両者の値はほぼ等しいが、下流域では $x = x_i$ において前者の方が大きい。衝突平板の影響を受ける領域を $P_i = P_{tm}$ となる衝突点から噴出口方向への距離 $x_i - x$ とみなせば、この距離は、 x_i の増大とともに大きくなる傾向がうかがえる。

(a) along y

(b) along z

Fig. 7 Pressure on impingement plate

4.3 衝突平板上の圧力分布

各衝突距離 x_i における衝突平板 y, z 軸上における圧力 P を噴出口総圧 P_i と噴出口短辺 h でそれぞれ無次元化して Fig. 7 (a), (b) に示す。 $x_i/h = 0.5, 1$ で明確に現われている負圧領域は、 $x_i/h \geq 5$ ではほとんど認められない。

衝突平板上の圧力分布の広がりを $P = P_i/2$ となる y, z 軸上の点を b_y, b_z とし、自由噴流の断面内で総圧が $P_{im}/2$ となるそれらを b_{my}, b_{mz} とした半値圧力幅を、対比して Fig. 8 に示す。両者の半値幅の x_i および x による変化はたがいに同様な傾向を示している。また、 $b_y > b_{my}, b_z < b_{mz}$ となっている実験点は、衝突噴流が平板上で主として y 軸方向へ流出していること [Fig. 2 (b), (c)] を反映しているものと考えられる。

Fig. 8 Pressure half-width

Fig. 9 Contour plots of pressure half-value ($P = P_i/2$) on impingement plate

衝突平板上の全面における圧力分布の広がりの概要を示すために、 $P = P_i/2$ となる平板上の点 (半値圧力点) を求め Fig. 9 に示す。広がりの分布形は、衝突距離に依存する流れ様式の変化 (Fig. 2) にもかかわらず、自由噴流の場合¹¹⁾と同様に、本実験の範囲においては y, z 両軸をそれぞれ長軸、短軸とするだ円で近似できそうである。

Fig. 10 には、衝突点圧力で無次元化した平板上の圧力 P/P_i の各値に対する等圧力点の概要を $x_i/h = 10$ の場合について例示する。各等圧力点の輪郭を見れば、いずれの場合も先きに示した半値圧力点の輪郭と同様に、圧力分布形がだ円形で近似されることを示している。

Fig. 10 Contour plots of pressure on impingement plate

衝突距離が小さい場合に見られる衝突平板上の負圧分布形の x_i 変化を調べるために、衝突点圧力 P_i で無次元化した衝突平板 y, z 軸上の圧力分布を Fig. 11 (a), (b) にそれぞれ示す。負圧分布が明確な $x_i/h = 0.5, 1$ では、 y 軸上における負圧が z 軸上のそれよりも大きい。 x_i の増大とともに両軸上の負圧の最大値は小さくなり、かつ噴流中心軸より離れた位置で生じており、 $x_i/h \geq 3$ では明確な負圧領域は消滅している。

衝突平板上の全面における負圧分布形の概要を示すために、 $x_i/h = 0.5, 1$ の場合について $P/P_i = 0, -0.1$ となる点を求めた結果を、それぞれ Fig. 12 (a), (b) に示す。この負圧値が -0.1 となる二つの実験点 ($\bigcirc, \ominus$) の間の領域に注目すれば、 z 軸上付近において衝突距離による負圧領域の大きさの差異が著しい。このことは、 $x_i/h = 0.5, 1$ において z 軸上付近の流れ様式がたがいに異なっていること (Fig. 2(a), (b)) と関連があるものと推定される。

Fig.13には、 $x_i/h = 1$ の場合について、異なる y 位置における x 軸上の衝突平板上圧力分布形を例示した。 y 軸上においても負圧となる $|y| \geq 2$ のプロファイルにおいて、 $|y|$ の増大とともに負圧領域の x 方向幅が小さくなり、またプロファイルの両端にある極大値を示す負圧領域も消滅している。この過程で $|y|/h = 2.5$ あたりで負圧が最大値を示している。図示はしないが、同様な負圧分布の傾向は、上述の場合と

(a) along y (b) along z

Fig. 11 Negative pressure on impingement plate

は流れ様式が異なる $x_i/h = 0.5$ の場合にも認められた。このことは、噴出口端板の影響がそう単純ではないことを示唆している。したがって、これまでに明らかにされている衝突噴流の流れ領域の区分^{[10], [12]}との対応には、衝突距離によって変化する噴出口端板と衝突平板間の流れについて逐一詳細に調べることが必要であり、今後の課題である。

(a) $x_i/h = 0.5$ (b) $x_i/h = 1$

Fig. 12 Contour plots of negative pressure

Fig. 13 Pressure profile on impingement plate at different transverse locations

5. 結 言

噴出口に端板がある縦横比5の長方形管から噴出し、平板へ衝突する噴流について行った実験結果より、次のことが明らかになった。

- (1) 衝突平板上で、 y 軸方向へは常に流出するが、 z 軸付近においては、衝突距離 x_i とともに流れの方向が変化する。すなわち、 $x_i/h = 0.5$ では y 軸上と同様に平板縁より流出しているが、 $x_i/h = 0.8$ では逆に平板縁において流入している。この傾向は $x_i/h = 5$ までは明確であり、さらに衝突距離が増大するとともに再び平板縁より流出する傾向がしだいに明確になる。
- (2) $x_i/h \leq 5$ の衝突距離が小さい場合において、噴出口端板と衝突平板間の流れに噴出口へ向かう明確な流線があることを見出した。このことが、噴出口付近に形成される負圧領域への巻き込みあるいはエントレインメントに起因していることが示唆された。
- (3) 衝突平板上の圧力分布には $x_i/h < 3$ において明確な負圧領域がある。負圧分布における y 、 z 両軸上の極小値は x_i の増大とともにすみやかに小さくなり、かつ噴流中心軸より離れた位置で生ずるようになる。
- (4) 衝突平板上の圧力分布の広がりとは自由噴流断面の総圧分布のそれとは、 y 、 z 両軸上の広がりにいくぶん差異があるものの、ほぼ同様の傾向を示す。

以上のように、大きい噴出口端板と衝突平板を用いた最も典型的な場合についての基本的大要が得られた。流れ場についての詳細な測定、また、長方形噴出口の

縦横比・形状、噴出口端板と衝突平板の大きさ、噴出速度などの影響についても検討することが今後の課題である。さらに、本報告を踏まえ、ノズル・フラッパー、噴射サーボ管などにかかわるより具体的資料の提供を行うこととしたい。

終わりに、本実験に協力いただいた当時信州大学工学部学生 畠山克也〔マキタ電機㈱〕・竹内 克〔日精樹脂㈱〕両君、ならびに本報告をまとめるにあたり有益な討論をいただいた岡山大学 和田 力教授に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 鈴木：フルイディスク技術の体系化(6) フルイディスク「変位センサ」、油圧と空気圧、16-4, 41/50 (昭60)。
- 2) 大宮司・白畑：非定常二次元粘性流れの数値解法(第3報、境界壁が運動する場合)、日本機械学会論文集、43-365, 159/166 (昭52)。
- 3) 濱・ほか2名：色素法による平板に衝突する噴流の流れ様式の観察、油圧と空気圧、16-7, 44/53 (昭60)。
- 4) W.R. Saripalli: Visualization of Multijet Impingement Flow, AIAA J., 21-4, 483/484 (1983)。
- 5) 原田・尾崎：流子工学、35, 養賢堂 (昭49)。
- 6) D.R. Kotansky and L.W. Glaze: Impingement of Rectangular Jets on a Ground Plane, AIAA J., 20-5, 585/586 (1982)。
- 7) 熊田・ほか2名：衝突噴流による熱および物質伝達について、日本機械学会誌、76-655, 822/830 (昭48)。
- 8) E. Gutmark・ほか2名：The Plane Turbulent Impinging Jet, J. Fluid Mech., 88-4, 737/756 (1978)。
- 9) 山田・ほか3名：くさび面の二次元衝突噴流に関する実験(平均流の特性)：日本機械学会論文集(B編)、51-470, 3297/3302 (昭60)。
- 10) I. Tani and Y. Komatsu: Impingement of a Round Jet on a Flat Surface, Proceedings of the Eleventh International Congress of Applied Mechanics, Munich, 672/676 (1964)。
- 11) 土屋・ほか3名：長方形噴流の拡散に関する研究(第2報、平均速度拡散におよぼす噴出口形状の影響)、日本機械学会論文集(B編)、51-461, 85/94 (昭60)。
- 12) N. Rajaratnam: Turbulent Jets, 231/234, Elsevier (1976)。