同軸対向衝突噴流の定常特性*

山本圭治郎**・野本 明**・横山 雅夫**

Steady-state Characteristics of Coaxial Impingement of Opposing Jets

Keijiro YAMAMOTO**, Akira NOMOTO** and Masao YOKOYAMA**

For the purpose of clarifying the working characteristics of an impact modulator and to get a guide to design thereof, the steady-state characteristics of coaxial impingement of two-dimensional jets and that of axisymmetric jets are studied. A wide range of nozzle exit Reynolds numbers is considered for different nozzle spacings.

The positions of the impingement surface for a given ratio of flows velocities from the opposing nozzles and of pressures in the nozzles are found to be strongly dependent on the Reynolds number and nozzle spacing. A similarity of velocity distribution is found along the flow after impingement. An analytical model based on centerline total pressure balance at the impinging position is established, and is shown to be in good agreement with experiment.

1. 緒 言

同軸対向衝突噴流現象は、フルイディクス素子の中でも優れた特性をもつ衝突流要素子の基本的動作原理である。現在実用されている素子は、全て3次元軸対称形状のものである。しかし、素子を含む回路全体の集積化や製作上の容易さ等の観点からは、むしろ2次元形状の方が有利である。これまでに衝突噴流の定常的特性を扱った例は、3次元軸対称噴流の場合について、Misevich¹⁾, Katz²⁾, Katz and Reid³⁾ 等、2次元噴流の場合について野本・原・山本⁴⁾ がそれぞれ衝突面位置の決定のための経験的計算モデルを提案している。しかし、いずれも適応範囲に限りがあり、また衝突面位置以外の流れ場の特性については調べられていない。

本研究は、衝突流要素子の特性を解明し設計指針を得るために特に重要な、衝突面の位置および形状、衝突後の流れについて調べ、さらに、衝突面位置の決定機構を明らかにする。対象は、3次元軸対称噴流および拘束2次元噴流の同軸対向衝突現象で、作動流体は空気である。

Nomenclature

Latin characters

A : area, b_x : width of flow after impingement, $b_{x(1/2)}$: value of b_x for which $v/v_m=1/2$, b_z : width of flow after impingement (radial flow), $b_{z(1/2)}$: value of b_z for which $v_r/v_{rm}=1/2$, c : flow coefficient, d : diameter, d_c : confining plate spacing, L_{cd} : distance from nozzle exit to the end of characteristics decay region, L_{cf} : free jet potential core length, L_{ci} : impinging jet core length, L_r : axial region of restricted nozzle flow, l : nozzle spacing, p : pressure (static), p_f : centerline total pressure of free jet, p_t : stagnation pressure of jet impinging on opposing one, p_{tp} : stagnation pressure of jet impinging on flat plate, p_0 : jet total pressure at nozzle exit, p_s : supply total pressure for supply line, q_t : velocity in supply line, r : radial coordinate, R : Reynolds number, u : velocity component in x -direction, u_0 : magnitude of initial velocity at rectangular nozzle exit, v : velocity component in y -direction, v_r : velocity component in r -direction, v_z : velocity component in z -direction, v_{z0} : magnitude of initial velocity at axisymmetric nozzle exit, w_0 :

* 昭和49年9月9日 原稿受付

** 大阪大学工学部 (Faculty of Engineering, Osaka University, Suita)

width of rectangular nozzle, z : cartesian coordinate along nozzle axis, with origin in nozzle I exit plane, z' : coordinate along nozzle axis, with origin in impingement surface, z_t : axial distance to impingement surface, y : cartesian coordinate perpendicular to x -axis, r : cylindrical coordinate along nozzle axis, with origin in nozzle I exit plane, r' : coordinate along nozzle axis, with origin in impingement surface, r_t : axial distance to impingement surface.

Greek characters

ζ : resistance coefficient of supply line, ν : kinematic viscosity, ρ : density, $\varphi(z_t)$, $\varphi(r_t)$: normalized restricted nozzle flow function.

Subscripts

0: at nozzle exit, 01: at nozzle I exit, 02: at nozzle II exit, 1: refer to supply line I, 2: refer to supply line II, ξ : on nozzle axis, f : refer to free jet, i : refer to jet impinging on opposing jet, i_p : refer to jet impinging on flat plate, l : refer

Fig. 1 Axisymmetric 20 mm nozzle (dimensions in millimeters)

Fig. 2 Axisymmetric 3 mm nozzle (dimensions in millimeters)

Fig. 3 Experimental set-up for 20 mm nozzles

Fig. 4 Experimental set-up for 3 mm nozzles

to supply line, m : maximum value of, s : at hypothetical point source of flow after impingement.

Superscripts

($\bar{}$): spacial mean of

2. 3 次元軸対称同軸対向衝突噴流

2.1 実験装置および方法

3次元軸対称形状のノズルは、主に直径 $d_0=20$ mmの大形のものを、一部、直径3 mmの小形のものを、用いた。これらの形状・寸法をFig. 1とFig. 2にそれぞれ示す。大形ノズルの絞り部曲線は誤差関数によって計算されたものである³⁾。実験装置の概略を、大形ノズルと小形ノズルの場合について、それぞれFig. 3とFig. 4に示す。流速の測定は定温度形熱線風速計とビトー管によった。熱線の長さは2.0 mmで、プローブの直径は2.0 mm、長さは120 mmである。ビトー管の直径は0.3 mmと0.8 mmである。圧力計は、傾斜管マノメータとベッツ形マノメータを用いた。ノズルにおける全圧を、大形ノズルの絞り部上流端の中心軸に設けた直径1.0 mmのビトー管によって測定した。この全圧をノズル圧と呼ぶ。これはノズル出口における中心軸上の全圧に等しかった。すなわち、ノズルによる全圧の降下はなかった。

2.2 実験結果

2.2.1 ノズル出口速度分布 衝突面が一方のノズル近くにある場合には、そのノズルの出口速度分布は影響を受けて変化する。衝突面とノズルIとの軸上

$d_0=20$ mm, $l/d_0=2.5$, $p_{01}=2.49 \times 10^{-3}$ bar ($R_0=22800$), $\bar{v}_{z02}/\bar{v}_{z01}=1.08$

Fig. 5 Effect of impingement surface on velocity distribution across nozzle exit

の距離 z_i が $0.5 d_0$ の場合の出口速度分布を Fig. 5 に示す。図において、ノズル I および ノズル II の出口

Fig. 6 Impingement surfaces at several positions

(a) $d_0 = 3$ mm, $R_0 = 1 600$

(b) $d_0 = 3$ mm, $R_0 = 6 400$

(c) $d_0 = 20$ mm, $R_0 = 24 700$

Fig. 7 Position of impingement surface with respect to initial velocity ratio

速度分布, v_{x01} および v_{x02} は、衝突面の影響を受けていないノズル II の最大出口速度 v_{x02m} で無次元化されている。 $\bar{v}_{x02}/\bar{v}_{x01}$ は、ノズル I および ノズル II における噴流の初速 (平均値) の大きさの比、 l はノズル間距離、 p_{01} はノズル I のノズル圧、 $R_0 = \bar{v}_{x01} d_0 / \nu$ は噴流のノズルレイノルズ数である。衝突面の影響を受けるノズルの出口速度分布は、ノズル軸上で極小となる軸対称分布を示す。

2.2.2 衝突面の形状と位置 本実験において、衝突面は、ノズル中心軸とその近傍においては、ノズル軸方向の速度成分 v_x が最小となる。そして、放射流においては、半径方向の速度成分 v_r が最大となる面として測定した。衝突面の形状を Fig. 6 に示す。 $\bar{v}_{x02}/\bar{v}_{x01} = 1.0$ の場合、衝突面はノズル間中央に、ノズル軸に垂直に形成されるが、1.0 から増減するに従ってわずかながら湾曲する。衝突面の軸上の位置 z_i について、まず Fig. 7 (a), (b), (c) に、 $\bar{v}_{x02}/\bar{v}_{x01}$ と $(z_i - l/2)/d_0$ の関係を、 l/d_0 をパラメータとして示す。衝突面の位置は初速比の変化に対して $\bar{v}_{x02}/\bar{v}_{x01}$

$d_0 = 20$ mm, $p_{01} = 2.49 \times 10^{-3}$ bar ($R_0 = 24 700$)

Fig. 8 Position of impingement surface with respect to nozzle pressure ratio

$d_0 = 20$ mm, $l/d_0 = 3.0$, $R_0 = 24 700$, $\bar{v}_{x02}/\bar{v}_{x01} = 1.01$

Fig. 9 Similarity of velocity distribution in radial flow

$=1.0$ において最も敏感である。特に、 $l/d_0 \geq 5.0$ では、 l/d_0 が小さいほど敏感である。レイノルズ数については、1600 の場合が最も敏感で、 $2.7 \leq l/d_0 \leq 12$ で感度が無限大となり、衝突面位置は不定となり、測定できない。 $R_0=6400, 24700$ では $2.7 \leq l/d_0 < 5.0$ で不定となる。次に、Fig. 8 にノズル圧比 p_{02}/p_{01} と $(z_1 - 1/2)d_0$ の関係を l/d_0 をパラメータとして示す。 $l/d_0 < 5.0$ の場合に衝突面位置は p_{02}/p_{01} に対して不定となる。

2.2.3 衝突後の流れ（放射流） 衝突後の流れ（放射流となる）の半径方向速度分布を Fig. 9 に示す。図において、速度成分 v_r は速度分布の最大値 v_{rm}

$d_0=20$ mm, $R_0=24700$

Fig. 10 Maximum velocity decay in radial flow

$d_0=20$ mm, $R_0=24700$

Fig. 11 Spread of radial flow

$d_0=20$ mm, $R_0=24700$

Fig. 12 Hypothetical point source of radial flow as a function of nozzle spacing

で、また、衝突面に原点を持ち、ノズル軸に平行な座標 z' は $v_r/v_{rm}=0.5$ となる半値幅 $b_{z(1/2)}$ で、それぞれ無次元化されている。放射流の速度分布は、相似性を持ち、発達した2次元自由噴流のものと同様である。放射流の最大速度 v_{rm} の減衰特性を Fig. 10 に、広がり特性を Fig. 11 にそれぞれ示す。 v_{z01m} はノズル1出口の最大流速である。広がり特性の実験式として、 $l/d_0=3.0, 5.0, 8.0$ に対してそれぞれ $b_{z(1/2)}/d_0 = 0.25(r/d_0) - 0.18$, $b_{z(1/2)}/d_0 = 0.31(r/d_0) - 0.18$, $b_{z(1/2)}/d_0 = 0.36(r/d_0) - 0.13$ を得た。Fig. 10 の実験は、この実験式をもとにした、運動量保存則による計算結果であり、放射流の運動量が保存されていることを示している。放射流の仮想原点のノズル軸からの距離 r_s は、Fig. 12 に示すように、 l が小さくなると増加し、下流側に移る。以上のことは、衝突面が極端に一方のノズルに接近している場合を除いて成立する。

実用に際し、数個の素子を積層化する必要があり、その際何らかの拘束壁が存在すると考えられる。この場合に放射流の受ける影響を調べた。ノズルをはさむ2枚の拘束板の間隔 d_c を変化させた場合の、 $r=3.0d_0$ における放射流の速度分布の変化を Fig. 13 に示す。拘束板の軸方向長さは $13d_0$ で、幅は $33d_0$ である。 d_c が小さくなるに従って、速度分布は平らになって行き、 $d_c/d_0=1.7$ で放射流は不安定となり、1.0 で発振現象⁹⁾を示した。

$d_0=3$ mm, $R_0=6400$, $l/d_0=10$, $\bar{v}_{z02}/\bar{v}_{z01}=1.0$

Fig. 13 Effect of confining plates on radial flow

3. 拘束2次元同軸対向衝突噴流

3.1 実験装置および方法

ノズルの形状・寸法を Fig. 14 に示す。ノズル幅 $w_0=10$ mm、アスペクト比は 5.0 である。絞り部曲線は、前述の3次元大形ノズルと同様、誤差関数によるものである。整流格子として 25°mesh の金網を入れてある。空気供給回路は前述の3次元大型ノズルの場合と全く同じである。拘束平板の大きさは 950×500 mm² である。測定法も3次元流の場合と同様である。ノズルによる全圧降下は無く、ノズル圧はノズル出口中心軸上全圧に等しかった。静圧場の測定は、拘束板

Fig. 14 Two-dimensional nozzle (dimensions in millimeters)

に 5.0 mm 間隔にあげた直径 0.6 mm の測定孔によった。

3.2 実験結果

3.2.1 流れ場の静圧分布 $l/w_0=5.0$ の場合の測定例を Fig. 15 に示す。静圧 p はノズル I のノズル圧 p_{01} で無次元化されている。 $\bar{u}_{02}/\bar{u}_{01}$ は初速 (平均値) の大きさの比で、 $R_0=\bar{u}_{01}w_0/\nu$ は噴流のノズルレイノルズ数である。静圧は衝突面位置付近で急上昇しており、衝突面に近いノズル II 出口付近の静圧は上昇し、ノズル軸に対称な分布を示している。Fig. 16 に衝突面がノズル II の出口付近にある場合の、ノズル軸

$l/w_0=5.0$, $p_{01}=6.90 \times 10^{-3}$ bar ($R_0=20\ 100$), $\bar{u}_{02}/\bar{u}_{01}=0.75$

Fig. 15 Contour plots of static pressure

$l/w_0=3.0$, $p_{01}=15.7 \times 10^{-3}$ bar ($R_0=30\ 400$), $\bar{u}_{02}/\bar{u}_{01}=0.5$

Fig. 16 Centerline static pressure distribution

上の静圧 p_L の分布を示す。ノズル II 内部の静圧がかなり上昇している。

3.2.2 ノズル出口速度分布 Fig. 17 に、 $\bar{u}_{02}/\bar{u}_{01}=2.1$ の場合の、ノズル I とノズル II の出口速度分布を示す。衝突面とノズル I との距離は $0.3 w_0$ であり、衝突面の影響でノズル I の静圧が上昇し、ノズル軸に対称な分布を示すために、初速度分布は中心軸で極小となる対称分布を示している。

$l/w_0=3.0$, $p_{01}=9.96 \times 10^{-3}$ bar ($R_0=11\ 400$), $\bar{u}_{02}/\bar{u}_{01}=2.1$

Fig. 17 Effect of impingement surface on velocity distribution across nozzle exit

3.2.3 衝突面の形状と位置 本実験において、衝突面は、ノズル中心軸とその近傍においては、静圧が最大となる、そして、衝突後の流れにおいては、速度 v が最大となる面として測定した。衝突面の形状を

$l/w_0=3.0$, $R_0=20\ 100$

Fig. 18 Impingement surfaces at several positions

Fig. 19 Position of impingement surface with respect to initial velocity ratio ($R_0=20\ 100$)

Fig. 18 に示す。初速比が1.0から増減するに従ってわん曲する。衝突面位置 x_1 について、Fig. 19 に $\bar{u}_{02}/\bar{u}_{01}$ と $(x_1 - l/2)/w_0$ の関係を、 l/w_0 をパラメータとして示す。 $l/w_0 = 5.0$ の場合には、 $0.88 \leq \bar{u}_{02}/\bar{u}_{01} \leq 1.14$ で発振現象を示した。また、 $l/w_0 = 3.0$ の場合には、 $\bar{u}_{02}/\bar{u}_{01} = 1.0$ で対向噴流がノズル深さ方向に互いにすれ違ったまま安定する現象が見られた。この現象の発生機構はまだ明らかでない。これらの現象は3次元軸対称流の場合には見られないものである。 $l/w_0 = 3.0, 5.0$ の場合、衝突面位置に関係なく $p_{02}/p_{01} = 1.0$ である。

3.2.4 衝突後の流れ 衝突後の流れのノズル軸に垂直な方向の速度成分を Fig. 20 に示す。速度成分 v は分布の最大値 v_m で、衝突面に原点を持ち、ノズル軸に平行な座標 x' は $v/v_m = 0.5$ となる半値幅 $b_{x(1/2)}$ で、それぞれ無次元化されている。速度分布には相似性があり、発達した2次元自由噴流のものと同様である。衝突後の流れの最大速度 v_m の減衰特性を

Fig. 20 Similarity of velocity distribution in flow after impingement

Fig. 21 Maximum velocity decay in flow after impingement ($R_0 = 24\,000$)

Fig. 22 Spread of flow after impingement ($R_0 = 24\,000$)

Fig. 23 Hypothetical point source of flow after impingement ($R_0 = 20\,500$)

Fig. 21 に、また、広がり特性を Fig. 22 に、それぞれ示す。広がり特性の実験式として、 $l/w_0 = 3.0, 5.0$ に対して、それぞれ、 $b_{x(1/2)}/w_0 = 0.17(y/w_0) + 0.4$, $b_{x(1/2)}/w_0 = 0.18(y/w_0) + 0.52$ を得た。Fig. 21 の実線は、Fig. 22 の実験式をもとにした運動量保存則による計算結果であり、衝突後の流れの運動量が保存されていることを示している。衝突後の流れの仮想原点のノズル軸からの距離 y_s は、Fig. 23 に示すように、 l が小さくなると減少し、ノズル軸に近づく。以上のことは、衝突面が極端に一方のノズルに接近している場合を除いて成立する。

3.2.5 ノズル軸に垂直な壁の影響 衝突後の流れは、ノズル軸に垂直な壁がある場合には、この壁との間に低圧渦（付着渦）を形成して壁に付着する。この現象は流れ場を安定にする効果があるが、反面、衝突面位置の変化にヒステリシス現象をもたらす。Fig. 24 に、ノズル軸に垂直な面を対向した二つのノズル出口の両側に 30 mm 付け加えた場合の、初速比と衝突面位置の関係を示す。衝突後の流れがノズル出口壁に付着する現象のために、ヒステリシスが生じている。

4. 衝突面位置の決定機構

4.1 解 析

衝突面のノズル軸上の点（衝突点）は、よどみ点になっているはずである。従って、対向した2つの噴流のノズル軸上の全圧は、この衝突点で静圧に回復しており、等しくなければならない。ゆえに、噴流が同軸上に対向した噴流に衝突した時に、衝突点で生じるよどみ圧 p_t の減衰特性曲線から衝突面位置が予測できる。しかし、この特性曲線を得ることは理論的のみならず、実験的にも非常に難しい。これは、衝突面の曲率の影響等、パラメータが多いことや、測定が困難であることによる。そこで、ここでは、衝突面を平板におきかえて測定したよどみ圧 p_{1p} の減衰特性から衝突面位置を計算する。

さて、自由噴流におけるポテンシャルコアの存在から類推できるように、 p_t 減衰曲線は、ノズルからしばらくの距離 L_{cl} 以内において一定値を示す。したがって、 $l < 2L_{cl}$ の場合には、ノズル圧比 $p_{02}/p_{01} = 1.0$ のとき衝突面位置がノズル圧比に対して不定となる範囲が存在する (Fig. 8)。しかるに、Fig. 7 と Fig. 19 に示されているように、 $l/d_0 = 2.0$, $l/w_0 = 3.0$ の場合に、初速比 $\bar{v}_{x02}/\bar{v}_{x01}$, $\bar{u}_{02}/\bar{u}_{01}$ が 1.0 のとき衝突面位置は初速比に対して確定する。この原理は次のように考えられる。今、ノズル I に直結した弁の開度を増したとする。当然 p_{01} は上昇し、衝突面をノズル II の方へ移動させる。ノズル I の噴流の p_t はノズル II 出口においても減衰しないので、衝突面はノズル II に達しようとする。しかし、衝突面がノズル II に近づくに従って出口抵抗が増し、ノズル II の流量が減少するので、ノズル II とこれに直結した弁および管路による圧力損失も減少し、 p_{02} が上昇する。よって、 $p_{02} = p_{01}$ となるまで衝突面がノズル II に近づいて、その位置が確定する。

そこで、Fig. 25 に示すようなシステムについて考察する。ノズル I とノズル II に対する供給系統が独立しており、それぞれに絞りと管路による圧力損失があ

り、その係数を ζ_1 , ζ_2 とする。ノズル I 側の供給圧力を p_{s1} 、また、管路内平均流速を $\bar{q}_{11}$ 、ノズル II 側のそれらを、それぞれ p_{s2} , $\bar{q}_{12}$ とする。さらに、ノズル I およびノズル II のノズル圧を、それぞれ p_{01} , p_{02} とする。衝突面位置を z_t とする。絞りと管路による圧力損失の関係から、流体の密度を ρ とすると、次式が成立つ。

$$p_{s1} - p_{01} = \zeta_1 \rho \bar{q}_{11}^2 / 2 \quad (1)$$

$$p_{s2} - p_{02} = \zeta_2 \rho \bar{q}_{12}^2 / 2 \quad (2)$$

衝突面がノズルに近づくに従って噴流の流量が減少する。ノズル圧が p_{01} のとき、衝突面の位置が z_t の場合に、噴流がノズル I の出口で持つ平均流速 $\bar{v}_{x01t}$ と、自由に噴出する場合の平均流速 $\bar{v}_{x01f}$ との比を $\varphi(z_t)$ とする。

$$\varphi(z_t) = \bar{v}_{x01t} / \bar{v}_{x01f} \quad (z_t \geq L_r \text{ で } \varphi(z_t) = 1) \quad (3)$$

$$\bar{v}_{x01f} = c \sqrt{(2/\rho) p_{01}} \quad , \quad c: \text{流量係数} \quad (4)$$

よって、管路とノズルの断面積を、それぞれ A_l , A_0 とすると、次式が成立つ。

$$\bar{q}_{11} = (A_0/A_l) \bar{v}_{x01t} = (A_0/A_l) c \sqrt{2/\rho} \varphi(z_t) \sqrt{p_{01}} \quad (5)$$

ゆえに (1), (5) 式から次の様な関係式が得られる。

$$p_{s1} = \{1 + \zeta_1 (A_0/A_l)^2 c^2 \varphi^2(z_t)\} p_{01} \quad (6)$$

同様に、ノズル II 側については次の様になる。

$$p_{s2} = \{1 + \zeta_2 (A_0/A_l)^2 c^2 \varphi^2(l - z_t)\} p_{02} \quad (7)$$

衝突面位置が p_{02}/p_{01} に対して不定となる場合には $p_{01} = p_{02}$ であるから、次のような関係が成立する。

$$p_{s2}/p_{s1} = \{1 + \zeta_2 c^2 (A_0/A_l)^2 \varphi^2(l - z_t)\} / \{1 + \zeta_1 c^2 (A_0/A_l)^2 \varphi^2(z_t)\} \quad (8)$$

明らかに $l \leq 2L_r$ の場合 z_t と p_{s2}/p_{s1} は一対一に対応し、 p_{s2}/p_{s1} に対しては衝突面はノズル間に確定する。初速比に対しては、次の様な関係がある。

$$\bar{q}_{12}/\bar{q}_{11} = \bar{v}_{x02}/\bar{v}_{x01} = \{\varphi(l - z_t)/\varphi(z_t)\} \sqrt{p_{02}/p_{01}} \quad (9)$$

結局、 $l \leq 2L_r$ あるいは $l \geq 2L_{cl}$ の場合には、 p_{s2}/p_{s1} および $\bar{v}_{x02}/\bar{v}_{x01}$ に対して、衝突面はノズル間に確定し、一方、 $2L_r < l < 2L_{cl}$ の場合には、 $\bar{v}_{x02}/\bar{v}_{x01} = 1.0$ の時に、衝突面の位置は、ノズル間中央付近のある範囲内で、 p_{s2}/p_{s1} および $\bar{v}_{x02}/\bar{v}_{x01}$ に対して不定となる (Fig. 26)。

前述の実験においては $p_{s1} = p_{s2}$ であり、 ζ_1 , ζ_2 が弁

Fig. 25 Basic system of impinging jets for analysis

Fig. 26 Superposition of centerline total pressure distributions

により可変である。そして、3次元軸対称流の場合には $L_r = 1.35 d_0$ であるので、 $l \leq 2.7 d_0$ の場合は $p_{01} = p_{02}$ となり、(8) 式から次式が得られる。

$$\zeta_2/\zeta_1 = \{\varphi(z_1)/\varphi(l-z_1)\}^2 \quad (10)$$

すなわち、弁の開度によって衝突面の位置がきまる。2次元流の場合は $L_r = 2.5 w_0$ であるので、 $l \leq 5.0 w_0$ の場合に上述の事が成立っている。

4.2 計算結果

衝突面を平板で置き換えて測定したよみ圧 p_{1p} の減衰特性曲線を、自由噴流の中心線全圧 p_f のそれと比較して、Fig. 27 に示す。 p_{1p} は直径 260 mm の円板の中心に開けた直径 0.8 mm の圧力測定孔によって測定した。この減衰曲線を用いて、Fig. 26 に示すような図的な計算方法で、ノズル圧比と衝突面位置の関係を求めた結果を Fig. 8 に実験値で示した。計算値は実験値を良く近似しており、 p_{1p} 減衰曲線を用いることによって、十分精度よく衝突面位置を予測できることが明らかとなった。

Fig. 27 Centerline total pressure degradation in free and wall impinging jets

Fig. 28 Effect of impingement on initial velocity. axisymmetric jets, $d_0 = 20$ mm, $p_{01} = 2.49 \times 10^{-3}$ bar ($R_0 = 24700$): (a), two-dimensional jets, $w_0 = 10$ mm, $p_{01} = 9.96 \times 10^{-3}$ bar ($R_0 = 24000$): (b)

次に、(8) 式を実証する。 $\varphi(z_1)$ の実験値と、これをもとにした実験式(破線)、およびポテンシャル流れを仮定して得た理論曲線^{7),8)}(実線)を、3次元軸対称噴流と2次元噴流について、Fig. 28(a) と (b) にそれぞれ示す。実験値は、衝突噴流の場合と、衝突面を平板(2次元噴流の場合は長さ 500 mm のもの)で置き換えた場合のものを比較して示した。両者はほぼ一致しており、衝突面を平板で置き換えて得ることを示している。管路内に金網または布を挿入して、損失係数を以下の如く種々変化させて実験した。計算に必要な数値および実験式を合わせて示す。

3次元軸対称噴流: $\zeta_1 = \zeta_2 = 1.16 \times 10^7 R_l^{-1.41}$, $1.38 \times 10^7 R_l^{-1.41}$, $1.64 \times 10^7 R_l^{-1.41}$ の3種類で、 $c = 0.894$, $A_0/A_1 = 1/100$, $\varphi(z_1) = 1 - \exp(-z_1/0.25 d_0)$, ただし、 R_l は直径 d_l の管路内流れのレイノルズ数で、 $R_l = \bar{q}_l d_l \nu$. また、 $d_l = 200$ mm.

2次元噴流: $\zeta_1 = \zeta_2 = 4.6, 5.7, 7.4$ の3種類で、 $c = 0.87$, $A_0/A_1 = 1/5$, $\varphi(z_1) = 1 - \exp(z_1/0.5 w_0)$.

これらを用いて、(8) 式によって計算した結果を、Fig. 29 (a) と (b) に、それぞれ3次元軸対称噴流と2次元噴流の場合について、実験と比較して示す。計

Fig. 29 Effect of supply line resistance on sensitivity of impingement surface position as a function of supply pressure ratio. axisymmetric jets, $l/d_0 = 2.5$, $p_{01} = 2.49 \times 10^{-3}$ bar ($R_0 = 24700$): (a), two-dimensional jets, $l/w_0 = 3.0$, $p_{01} = 9.96 \times 10^{-3}$ bar ($R_0 = 24000$): (b)

算値は実験値をよく近似している。

また、(9)式による初速比と衝突面位置の関係の計算値を、Fig. 7 (c) と Fig. 19 に実線で示し、実験値と比較した。計算値は実験値を良く近似している。

以上により、衝突面位置の決定機構が明らかになり、衝突面位置の予測が可能になった。そしてこれまで、 l が非常に小さい場合には、衝突面は極度に敏感で、定まらなるとされてきたが、ノズルに絞り等を直結し、これを調整することによって、衝突面位置の感度を制御できることが明らかとなった。衝突流要素子は、出力の回復圧を大きくし、小形化することが有利であるので、ノズル I とノズル II をそのまま差動入力口とする SIM においては、ノズル間距離を小さくすることが望ましい。これらのことから、SIM の場合、ノズル間距離をノズル直径あるいは幅の 2~3 倍として、ノズル I とノズル II に可変絞りを直結して、これによって素子のゲイン調整をするという、有用な設計指針が見出される。

5. 結 言

3 次元軸対称噴流および拘束 2 次元噴流の同軸対向衝突現象の定常的特性が、以下の如く明らかとなった。

(1) 衝突面がノズルに接近すると、ノズル出口では静圧が上昇し、ノズル軸上で最大となる軸対称分布を示し、初速が低下し、ノズル軸上で極小となる軸対称な速度分布を示す。

(2) 衝突面の形状は、初速比が 1.0 のとき平面で、1.0 から増減するとそれに応じて湾曲する。

(3) 衝突面位置のノズル圧比あるいは初速比の変化に対する感度は、ノズル間距離と噴流レイノルズ数に大きく依存し、衝突面位置が不定となる場合もある。特に拘束 2 次元流の場合には、ノズル圧比および初速比が 1.0 の近傍で、 $l/w_0 \geq 5.0$ の場合に発振現象を示し、また、 $l/w_0 = 3.0$ の場合には、対向噴流がノズル深さ方向に互いにすれ違ったまま安定する現象が発見された。

(4) 衝突後の流れは、運動量が保存され、衝突面が極端に一方のノズルに接近している場合を除いて、直線的に広がり、速度分布に相似性があり、2 次元自由噴流のものと同様の分布を示す。最大速度の減衰は、2 次元流の場合より 3 次元軸対称流の場合の方が激しい。仮想原点は、ノズル間距離が大きいほど上流側にあり、2 次元流の場合は常にノズル軸よりも上流側に

ある。従って、衝突流要素子の出力回復は、ノズル間距離が小さいほど良好であると予測される。

(5) 解析的には、ノズル軸上の全圧が釣合う所に衝突面が形成されるという原理をもとにして、衝突面位置の決定機構を明らかにした。実験曲線あるいは実験式を用いて得られた計算結果は、広範囲のノズル間距離において実験結果を良く近似した。特に実用上有用な、ノズル間距離の小さい $l \leq 2L_r$ の場合、さらに一般に、衝突面が一方のノズルに接近している場合には、ノズルに直結した絞りによって、供給圧力比に対する衝突面位置の感度を制御できるという、素子設計上重要な指針を見出した。

(6) 上述の結果から、新しい動作原理をもつ電気-流体制御素子を開発することができる。すなわち、 $l \leq 2L_r$ として、一定供給圧を絞りを介してノズルに供給し、この絞りの上流に電熱線を置くことによって、流体の粘性を変え、絞りによる圧力損失を変化させる方式のもの、あるいは、ウインズロ効果を利用して粘性を変化させる方式のもの等である。

終わりに、本実験に協力頂いた当時学生の大場省介、大海 治の両君に感謝致します。またノズルを製作して頂いた三国工業(株)に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) K.W. Misevich: The Impact of Opposing Axially Symmetric Jets, *Advances in Fluidics*, 98/115, ASME Publication (1967)
- 2) S. Katz: Pressure Gain Analysis of an Impacting Jet Amplifier Stage, *Advances in Fluidics*, 116/128, ASME Publication (1967)
- 3) S. Katz and K.N. Reid: A Generalized Static Model for Fluidic Impact Modulators, ASME Paper No. 70-WA/Flcs-2, 283/290 (1970)
- 4) 野本明・原美明・山本圭治郎: 液体を作動流体とする衝突流要素子, 第 7 回フルイディクスシンポジウム講演論文集, 79/84 (1972)
- 5) 萩原辰弥・多田嘉明: 長方形断面からの自由噴流のコア長さや拡散について, 第 5 回純流体要素シンポジウム資料, 37/42 (1970)
- 6) T. Strand: On the Theory of Normal Ground Impingement of Axi-Symmetric Jets in Inviscid Incompressible Flow, AIAA Paper, No. 64-424, 1/7 (1964)
- 7) T. Strand: Inviscid-Incompressible-Flow Theory of Static Two-Dimensional Solid Jets in Proximity to the Ground, *J. Aerospace Sci.*, 29-2, 170/173 (1962)
- 8) 山本圭治郎・野本 明・川島忠雄・中土宜明: 同軸対向衝突噴流の発振現象, *油圧と空気圧*, 6-2, 10/19 (1975)