219 非対称ノズルから噴出される超音速噴流の干渉特性

近畿大工 児島忠倫, 近畿大工 嶽間沢秀孝[○]
 鶴見製作所 高田益臣, 近畿大理工総研 松岡祥浩

Interference Characteristics of Supersonic Jets Issuing from Asymmetric Nozzle

Tadatomo KOJIMA, Hidetaka GAKUMASAWA,
 Masutomi TAKADA and Yoshihoro MATSUOKA

In this paper, the structure and behavior of the supersonic jets issuing from asymmetric single nozzle which had oblique outlet and two parallel asymmetric nozzles were studied mainly by the flow visualization. The flow visualization of mean and instantaneous flows with time were conducted by the schieren and shadowgraph methods, moreover mean total pressure distributions were measured. It was clarified that effect of oblique nozzle outlet on structure of pseudo-shock wave, and relation between distance of two parallel asymmetric nozzles and interference characteristics of two oblique jets.

1. 緒 言

超音速噴流の干渉に関する研究は、ジェット推進にともなう数個の噴流の干渉や人工衛星の姿勢制御などに関連し、興味のある問題として各方面で取り扱われている。平行噴流の干渉に関する研究はいくつか見られるが、これらはいずれも軸対称なオリフィスや直円管⁽¹⁾から噴出された平行噴流を対象としたものである。本研究では、出口部に斜め切り口を持たせた平行な2本の非対称ノズルから超音速で噴出する不足膨張噴流の構造と干渉特性を調べることを目的としている。はじめに、単一の非対称ノズルから噴出する不足膨張噴流について、可視化ならびに圧力測定を行い、非対称なノズル形状が噴流の構造や挙動に及ぼす影響を明確にし、さらに、2本の非対称ノズルの切り口面を互いに内向きにした場合の軸間距離を変化させた流れの可視化と圧力分布の測定を行い、噴流の構造および合流などの干渉特性におよぼすノズル軸間距離の影響をある程度明確にしている。

2. 実験装置および方法

噴流はフランジに取り付けられたノズルから静止大気中に連続的に噴出される。表1に実験に使用した単一非対称ノズルを、表2に平行非対称ノズルをそれぞれ示す。単一非対称ノズルには、内径9.2mm、出口部に傾斜角 60° を持たせたTP9SK60と、内径10mm、傾斜角 45° 、 60° のTP10SK45、TP10SK60を使用し、平行非対称ノズルには、内径6.1mm、傾斜角 45° のノズルの軸間距離をノズル内径の4倍の24.4mmとしたTP6M-Y45-

D4, 6倍の36.6mmとしたD6, 8倍の48.8mmとしたD8を使用している。また、流れの可視化では、シュリーレン法およびシャドウグラフ法により時間平均的および瞬間的な写真を撮影し、速度分布は、全圧、静圧プローブにより測定された定常値から求めている。実験は、よどみ圧 P_o を大気圧 P_a で除した圧力比 $P_o/P_a=1.0$ から6.0の範囲で行なっている。なお、単一の非対称ノズルを用いた実験では、各圧力比での偏向した噴流中心軸

Table 1 Shape of single asymmetric nozzle

Symbol	L (mm)	d (mm)	α ($^\circ$)	Shape
TP9SK60	46	9.2	60	
TP10SK60	50	10.0	60	
TP10SK45	50	10.0	45	

Table 2 Shape of two parallel asymmetric nozzles

Symbol	d (mm)	ℓ (mm)	Shape ($L=8d$)
TPQM-Y45-D4	6.1	24.4	
TPQM-Y45-D6		36.6	
TPQM-Y45-D8		48.8	

を $X1$ 軸, その噴流中心軸に対して垂直な軸を $Z1$ 軸と定義し, 2本の平行非対称ノズルを用いた実験では, ノズル間中心軸を $X2$ 軸, $X2$ 軸に対して垂直な軸を $Z2$ 軸と定義している。

3. 単一非対称噴流の構造

3.1 単一非対称噴流の形状特性 図1(a), (b)にノズル TP9SK60 の時間平均的な流れの擬似衝撃波⁽²⁾のシュリーレン写真を示す。コア領域を含む噴流は斜めに偏角を持った状態で図1(a)のように噴出される。噴流内にはノズル末端部の上側と下側から共に衝撃波が発生しており, これら両側から発生した斜め衝撃波は, 噴流境界層での反射や互いに衝突することで非対称な四角セルを形成する。図1(b)では, 四角セルは, 圧力比の増大とともに大きくなり, その内側には白い部分の過圧縮域と黒い部分の過膨張域との明暗差がはっきりと現れている。また, 出口末端部から発生している衝撃波の最初の衝突位置には, 下流側にかけて円筒状のスリップ面が発生しているのが確認できる。図2(a), (b)には, 単一非対称ノズル TP10SK45 の瞬間的な可視化写真を示しており, 圧力比の違いによる噴流の瞬間的な構造が可視化されている。図2(a)には, 時間平均的な写真では不明りょうであった噴流の広がり特性が鮮明に現われており, 拡散は第2四角セルより後方付近から徐々に広がっている。図2(b)では, 出口付近の衝撃波が鮮明になり, 周囲には, 噴流の自励振動により発生した微小じょう乱が確認できる。また, 第3四角セルより下流側においては, 四角セルが振動することにより拡散が顕著になっている。

図3に擬似衝撃波の無次元の長さ X_L/d と圧力比 Po/Pa との関係を示す。 $Po/Pa < 6$ での擬似衝撃波の長さは, ノズル内径の違いには関係なく圧力比の増大とともに長くなる傾向にある。しかし, TP10SK60 では, ある圧力比になると急激に長くなる所がある。これは, 擬似衝撃波内に他の圧力比では見られない対称形の四角セルが多く存在することにより拡散が小さくなったためと考えられる。また, 出口傾斜角が小さい 45° の場合には, ノズル切り口の開口面積が増大するために全体的に擬似衝撃波の長さは短くなる。

3.2 単一噴流中心軸上および噴流鉛直方向の速度・全圧分布 図4に TP9SK60 の噴流中心軸上の速度 U をノズル出口直後の速度 U_0 で除した無次元の速度 U/U_0 の分布を示す。横軸は, ノズル出口部からの距離 $X1$ を内径 d で除した無次元の距離 $X1/d$ である。各圧力比ともに流れは, 出口直後での過膨張域によって加速されている。特に, 圧力比 $Po/Pa=2.0$ において, 出口付近の領域では微小な変動をともなった分布となり, それぞれの極大, 極小値の位置は, 全圧分布の極小, 極大値にほぼ対応している。また, 下流域になるにしたがい, その極

 (a) $Po/Pa=2.0$

 (b) $Po/Pa=4.0$

Fig.1 Schlieren photographs of jet flow for TP9SK60

 (a) $Po/Pa=2.0$

 (b) $Po/Pa=4.0$

Fig.2 Instantaneous Schlieren photographs of jet flow for TP10SK45

Fig.3 Length of pseudo-shock wave

Fig. 4 Velocity distributions along central axis of jet flow

小値は増大する傾向にあり, 拡散が顕著になる付近から徐々に減速していく。 $Po/Pa=4.0$ では, 出口直後で急速した流れは, $X1/d=7.5$ まで $Po/Pa=2.0$ よりも大きな

速度変動をとめない、それ以降になると徐々に減速していく。このときの変動は、全圧分布の変動と対応していない。これは、非対称な四角セルの形や位置により、過圧縮、過膨張域の変化の割合と四角セルを形成する衝撃波の強さに違いがあるためと考えられる。 $Po/Pa=5.5$ になると加速された流れは、スリップ面の影響により急激に減速し、スリップ面の影響が弱くなってくると、 $X1/d=7.5$ 付近まで、徐々に変動をとめないながら増加する。また、境界層が弱まり、拡散が顕著になると、流れは $X1/d=13$ 付近まで変動をとめないながら減速し、それ以降の下流域では徐々に減衰する。

図5にTP9SK60の $Po/Pa=5.5$ における ZI 軸方向の全圧 P_t 分布を示す。 $X1/d=0.5$ 断面では、全圧は非対称な分布を示し、 $ZI/d=-0.6, 0.3$ 付近で衝撃波によって大きく低下している。 $X1/d=1$ 断面では、中央部に大きくくぼみを持つ非対称な凹型分布となっており、 $-0.5 \leq ZI/d \leq 0.2$ の範囲で過膨張域による圧力低下が見られる。また、 $X1/d=3, 5$ では、 $ZI/d=-0.15$ 付近に急激な圧力低下が現れるが、これは、噴流中に発生したスリップ面の影響によるものである。さらに、 $X1/d=10$ 以降の下流域では、中央部の圧力は、しだいに回復して凸型の分布となっている。

4. 非対称噴流の干渉特性

4.1 可視化による非対称噴流の干渉特性 図6(a)～(d)に、TP6M-Y45-D4を使用した場合の非対称噴流の時間平均的なシャドウグラフ写真を示す。図6(a)に示す $Po/Pa=1.52$ では、二噴流はそれぞれ独立した噴流となっており、干渉による誘引は見られないが、ノズル出口端から発生した衝撃波が噴流境界によって反射してわずかなのであるが噴流は偏向し、非対称な流れとなる。この場合の噴流の偏角は、単一噴流と同様にノズル出口の切り口角の影響によるものである。 $Po/Pa=3.3$ 付近から図6(b)に示すように、ノズル出口直後に黒い過膨張域が現れ、平行四辺形のセルが形成される。噴流は干渉による誘引の影響を受け互いに接近している。図6(c)では第5セル付近で二噴流は合流する。特に、第4セル付近で流れの内側は接触し、下流域で単一噴流となる。圧力比が大きくなると $Po/Pa=4.5 \sim 5.0$ 付近からスリップ面が発生し始め、合流部も上流へ移動する。図6(d)では、スリップ面は噴流中心軸よりやや外側で発生している。圧力が高くなるにつれて二噴流は干渉の影響が強くなり、より上流で合流する傾向にある。

4.2 圧力比と二噴流の交差角度の関係 図7に、TP6M-Y45-D4, D6, D8 および TP10SK45 における圧力比 Po/Pa と二噴流の交差角度 2θ の関係を示す。単一ノズルTP10SK45の場合は、偏角を2倍にしている。D4とD8は、いずれも圧力比の増加とともに交差角度は増大し、単一噴流の場合と同様の変化を示す。D4の場合には噴

Fig.5 Total pressure distributions in ZI direction

Fig.6 Shadowgraph photograph of jets flow for TP6M-Y45-D4

Fig.7 Intersecting angles of two asymmetric jets

Fig.8 Total pressure distributions along the center of axis between asymmetric nozzles

流が合流するが, D8 の場合には $P_o/P_a \leq 6$ の範囲では合流しない. そのため交差角度は噴流の合流の影響を受けず, ノズル中心軸間距離が長くなると小さくなる. D6 は合流する圧力比が大きいため, 誘引の影響が大きくなり, 交差角度は大きく上昇する. また, $P_o/P_a \leq 3.5$ の範囲で, TP10SK45 は TP6M-Y45 より交差角度が大きい, これはノズル内径が大きく, ノズル切り口面の開口長さが長いのである. しかし, TP6M-Y45 の場合は, 二噴流が互いに誘引しあうので, $3.5 < P_o/P_a < 5$ では偏角の差は小さくなり, $P_o/P_a > 5$ では D6 の方が TP10SK45 よりも偏角が大きくなる.

4.3 ノズル間中心軸上の全圧・速度分布 図 8 に, TP6M-Y45-D4, D8 のノズル間中心軸上の全圧分布を示す. D4 の $P_o/P_a = 5.89$ では, 噴流が合流する $X2/d = 3$ から全圧は急上昇し, $X2/d = 13$ まで単一噴流の過膨張, 過圧縮の繰り返しによる圧力変動が見られる. D4 の $P_o/P_a = 2.94$, D8 の $P_o/P_a = 2.95, 5.90$ では, 噴流は合流しないため全圧分布は緩やかな曲線となる. 図 9 にノズル間中心軸上の速度分布を示す. $P_o/P_a = 5.90$ では, D4 よりも D8 の方が衝突による損失が小さいために, 速度は減衰しにくい傾向にある.

4.4 鉛直方向の全圧・速度分布 図 10 に, TP6M-Y45-D4 の $P_o/P_a = 5.89$ における鉛直方向の全圧分布を示す. $X2/d = 1$ の $Z2/d = \pm 1.7$ 付近で極小値が見られる. 図 6 (d) の噴流写真より $X2/d = 1$ ではスリップ面は発生しておらず, 噴流の過膨張域による影響である. $X2/d = 5$ の $Z2/d = \pm 1$ でも極小値が見られるが, これはスリップ面の影響であり下流のため影響は小さい. また $Z2/d = 0$ では, 噴流境界が噴流内部にまで及んでおり全圧は急減している. $X2/d = 1$ から 5 へと下流へ進むにつれ, 噴流の合流により最大値が上昇している. $X2/d = 10$ は, $X2/d = 1$ とほぼ同じ最大値である. 図 11 に, TP6M-Y45-D4 の $P_o/P_a = 5.89$ における鉛直方向の速度分布を示す. 合流後の $X2/d = 10$ の最大値は $X2/d = 5$ と大きな差異は見られず, 合流により速度は上昇している.

5. 結 言

(1) 非対称ノズルから超音速で噴出された噴流は, 非対称な衝撃波群をともなった噴流中心軸の偏角する不足膨張噴流となるが, 軸対称の不足膨張噴流とはセル構造が異なる.

(2) 2 本の平行な非対称ノズルから噴出した噴流は, 圧力比の増加とともに互いに誘引し合流する.

(3) 圧力比が大きい場合には, 2 つの非対称噴流間の干渉による誘引が強くなり, 交差角度が単一の非対称噴流の偏角より大きくなる.

(4) 2 噴流は合流すると, 噴流の拡散が大きくなり減衰しやすくなる.

参 考 文 献

- (1) 児島・松岡, 機論, 54, B(1988), 1560.
- (2) 児島, 松岡; 機論, 53, B(1987), 3146.

Fig.9 Velocity distributions along the center of axis between two asymmetric nozzles

Fig.10 Total pressure distributions in $Z2$ directions, TP6M-Y45-D4, $P_o/P_a = 5.89$

Fig.11 Velocity distributions in $Z2$ direction, TP6M-Y45-D4, $P_o/P_a = 5.89$