2 個の平行な異径超音速噴流の干渉特性*

児 島 忠 倫^{*1}, 島 津 江 麻 里^{*1}
楊 京 龍^{*2}, 松 岡 祥 浩^{*3}Interference Characteristics of Two Parallel Supersonic
Jets Issuing from Pipes with Different DiametersTadatomo KOJIMA, Mari SHIMAZUE,
Jinglong YANG and Yoshihiro MATSUOKA

In this work, the interference characteristics of two parallel underexpanded jets issuing from straight circular pipes with different diameters were studied. Further, the influence of the distance between the central axes of the two pipes on the interference of jets was investigated. The inner diameters of the pipes used were 4.1 and 6.1 mm, and 6.1 and 9.1 mm, respectively. Flow visualization and measurement of velocity distributions were conducted; thus, the mechanism of pseudo-shock waves and equivelocity diagrams within a vertical section to the jets axes were clarified. As a result, it was found that the longitudinal vibration of flow was controlled by the difference between the cell lengths of the two jets. Thus, the supersonic flow was present in a considerably farther downstream range than the case with two parallel jets with equivalent inner diameter.

Key Words: Supersonic Flow, Flow Visualization, Shock Wave, Interference Flow, Underexpanded Jet

1. 緒 言

超音速噴流の干渉特性を明確にすることは、工学、工業上、重要かつ興味深いことがらであり、多くの研究が見られる。Soga ら⁽¹⁾は、2 個の平行なオリフィスから窒素を噴出させた場合の不足膨張噴流の干渉による衝撃波構造を明らかにしている。McDermott ら⁽²⁾は、二つの音速ノズルから混合気体を衝突させ、衝突角度と圧力比の違いが速度分布などに及ぼす影響を調べている。また、藤本ら⁽³⁾⁽⁴⁾は、二つの音速ノズルからアルゴンを噴出させ、衝突角度と圧力比を種々変化させた場合の衝突噴流の衝撃波構造を可視化によって明確にしているが、これらは、いずれも低圧の雰囲気内での研究が主体となっている。特殊の環境下で繊維ノズルやアトミゼーションノズルから大気中に噴出される超音速噴流の構造や挙動に及ぼすノズル形状、および噴流の干渉に関する研究等は、工業的に重要であるが、これらについての研究例はほとんど見られない。そこで、本研究は、超音速域での平行噴流や衝突噴流

について、圧力、速度、衝撃波構造、および流れの様子を調べ、干渉特性について明確にしようとするものである。今までに、同径の平行な 2 噴流(以下、同径平行 2 噴流と呼ぶ)や 3 噴流の干渉特性⁽⁵⁾⁽⁶⁾、および衝突 2 噴流の干渉特性⁽⁷⁾についての研究を行っている。

本報告は、直径の異なる 2 個の平行な不足膨張噴流(以下、異径平行 2 噴流と呼ぶ)の噴流軸間距離が、擬似衝撃波構造に及ぼす干渉特性を明確にすることを目的として、可視化や圧力、速度、および擬似衝撃波の長さなどについて調べている。その結果、異径平行 2 噴流では、擬似衝撃波を構成するセルの長さがそれぞれ異なるために振動が抑制され、同径平行 2 噴流⁽⁵⁾の場合よりもかなり下流域まで超音速流れが持続されることなど、同径平行 2 噴流と異径平行 2 噴流の干渉特性との違いを明確にしている。

2. 記 号

 d : 管内径 l : 供試管の軸間距離 $\bar{Ma}$: 管出口での平均マッハ数 P_t : 全圧 P_s : 静圧 U : 供試管中心軸方向の速度

* 原稿受付 1994 年 7 月 21 日。

^{*1} 正員、近畿大学工学部 (〒739-21 東広島市高屋うめの辺 1 番)。^{*2} 清華大学 (〒100084 北京市海淀区清華園)。^{*3} 正員、近畿大学理工学部 (〒557 東大阪市小若江 3-4-1)。

U_0 : 管出口での供試管中心軸上の速度

X : 供試管の軸間の中心軸上での管出口からの距離

X_L : 擬似衝撃波の長さ

Y : X 軸からの水平方向の距離

Z : X 軸からの鉛直方向の距離

3. 実験装置および方法

表1に、本実験で使用した供試管の諸元を示す。各供試管の管長は、内径の10倍としている。供試管6M($d=6.1$ mm)を基準として、内径の小さい4M($d=4.1$ mm)と大きい9M($d=9.1$ mm)の供試管をそれぞれ図1に示すように組合せた。2本の供試管の軸間距離が、噴流に及ぼす影響を調べるために、供試管の軸間距離 l を供試管6Mの内径の3, 4, 6倍および8倍に変化させた。噴流内の全圧、静圧は、著者らが開発した2種類のプローブ⁽⁶⁾を用いて、時間平均的な圧力を測定した。噴流局所の速度は、Rayleighのピトー管公式より修正マッハ数を求め、この修正マッハ数を用いて算出した。また、上流側での管路系等での流れは、断熱流れとなっているので、管出口の平均マッハ数は、上流側の管路に設置した四分円ノズルから得られる質量流束、よどみ温度、および管出口での圧力より算出した。実験は、2本の供試管とも管出口での平均マッハ数 $\bar{Ma}$ は同じであり、ほぼ1~2の範囲で行った。瞬間的な流れは、せん光時間が2 μ sのスパーク光源を用いて、シャドウグラフ法で可視化した。

表1 供試管

Test pipe	Pipe inner diameter d (mm)	Interval between two pipe axes l (mm)
TP6M-4M-D3		18.3
TP6M-4M-D4	6.1	24.4
TP6M-4M-D6	4.1	36.6
TP6M-4M-D8		48.8
TP6M-9M-D3		18.3
TP6M-9M-D4	6.1	24.4
TP6M-9M-D6	9.1	36.6
TP6M-9M-D8		48.8

図1 座標軸

4. 実験結果および考察

4・1 可視化による干渉特性 図2(a)~(e)は、供試管TP6M-4M-D4のマッハ数の違いによる瞬間的な流れをシャドウグラフ法によって可視化したものである。図2(a)に示す $\bar{Ma}=1.14$ 付近の流れは、単一噴流と同じように⁽⁸⁾、噴流軸方向の振動のために、管出口付近において重畳した強弱の衝撃波群が存在し、噴流同士の干渉による影響は、ほとんど見られない。図2(b)に示す $\bar{Ma}=1.39$ 付近の流れは、第4セル以降では、写真から判断すると縦方向への振動の激しい不安定な流れとなり、6M, 4Mの2噴流とも、急速に亜音速に減衰する。図2(c)に示す $\bar{Ma}=1.51$ の噴流径の大きい6Mの流れは、同径平行2噴流と異なり、2噴流の干渉が弱くなる⁽⁵⁾ので、噴流の振動が抑制され、次第に衝撃波の数が多くなる傾向にある。また、噴流径の小さい4Mの流れは、第2セル以降で拡散が激しく現れている。図2(d)に示す $\bar{Ma}=1.81$ の6Mの流れは、多数の衝撃波群より構成されており、かなり下流域まで超音速流れとなっている。しかし、4Mの噴流は、第3セル以降、急速に亜音速に減衰してしまう。図2(e)に示す $\bar{Ma}=2.13$ では、 $\bar{Ma}=1.81$ のような明りょうな衝撃波構造は見られないが、時間平均的な写真によると、6Mでは、1.81とほぼ同じ数のセル、4Mでは、1.81よりも多いセルより構成されている。なお、図2(d), (e)のいずれもスリップ面が見られるが、このスリップ面は、単一噴流でも形成されるものであり、干渉による影響ではない。特に、マッハ数1.7以上では、同径平行2噴流の干渉のものよりも、噴流の縦方向の振動が小さくなるために、かなり下流域まで超音速噴流となっている。これは、同径平行2噴流では、セルの長さがいずれも等しく、過圧縮域と過膨張域が同じ位置で干渉するために縦方向の振動がより激しくなり、急速に亜音速に減衰するのに対し⁽⁵⁾、異径平行2噴流では、噴流径が異なるために過圧縮域と過膨張域がずれて振動を生じにくくしているからと思われる。したがって、TP6M-4M-D4の異径平行2噴流では、TP6M-D4の同径平行2噴流に見られたような2噴流が互いに誘引、反発を繰返しながら減衰振動するパターンは、見られない。

図3(a)~(d)および図3(e)に、それぞれTP6M-9M-D4の瞬間的な流れと時間平均的な流れ(露光時間1/60 s)のシャドウグラフ法による写真を示す。図3(a)に示す $\bar{Ma}=1.1$ 付近では、図2(a)と同様に重畳した衝撃波群から構成される流れとなっている。図3(b)に示す $\bar{Ma}=1.34$ の流れは、図2(b)と同じ

く単一噴流に類似した振動の激しい不安定な流れとなり、6 M、9 M のいずれの噴流とも、第3セルより下流の衝撃波群は上下に振動し、第5～6セルで消滅してしまうために、流れは急速に亜音速に減衰する。図3(c)に示す $\bar{Ma}=1.55$ の流れは、図2(c)と類似の流れとなるが、噴流径の小さい6 M の流れでは、TP6 M-4 M-D4 の6 M の噴流よりも衝撃波の数は少なく早く減速してしまう。これは、TP6 M-4 M-D4 と供試管の軸間距離は同じであるが、互いの噴流境界の距離が近いために、噴流径の大きい9 M の影響を受けてい

るからと思われる。図3(d)に示す $\bar{Ma}=1.71$ においても、噴流径の小さい6 M の流れは、噴流の内側の境界層がTP6 M-4 M-D4 の場合よりも接近しているために、TP6 M-4 M-D4 のものより、早く亜音速に減衰してしまう。図3(e)に示す $\bar{Ma}=1.71$ の時間平均的な流れは、軸対称であり、単一噴流とほぼ同じ流れとなっている。

4・2 擬似衝撃波の長さ 可視化した多数の時間平均的な写真を用いて衝撃波の消滅するまでの距離 X_L を実測し、各供試管の内径で無次元化した擬似衝撃波の長さ X_L/d と平均マッハ数 $\bar{Ma}$ との関係を示す。

4・2・1 噴流径の影響 図4、5にそれぞれ供試管TP6 M-4 M-D4 とTP6 M-9 M-D4 の擬似衝撃波の長さを示す。いずれの図においても、同径平行2噴流TP6 M-D4 ($d=6.1\text{ mm}$, $l/d=4$) とそれぞれの単一噴流との比較を示している。

図4に示すTP6 M-4 M-D4における噴流6 M、4 M の擬似衝撃波の長さは、 $\bar{Ma}=1.3$ および1.5付近にそれぞれ極大、極小値をもつ単一噴流TP6 M、TP4 M と類似した傾向が見られるが、異径平行2噴流の6 M、4 M のほうが大きく、特に6 M では、同径平行2噴流TP6 M-D4 のものよりも $\bar{Ma}>1.5$ でかなり大きく現れている。この原因は、同径平行2噴流TP6 M-D4 では、前述したように振動が助長される

図2 シャドウグラフ写真 (TP6 M-4 M-D4)

図3 シャドウグラフ写真 (TP6 M-9 M-D4)

図4 擬似衝撃波の長さ (TP6 M-4 M-D4)

図5 擬似衝撃波の長さ (TP6 M-9 M-D4)

のに対し、異径平行2噴流 TP 6 M-4 M では、振動が抑制されるからと考えられる。単一噴流 TP 6 M, TP 4 M の長さよりも異径平行2噴流の 6 M, 4 M のものが大きいのも、このことが原因であると思われる。

図 5 に示す TP 6 M-9 M-D 4 における噴流 6 M, 9 M の擬似衝撃波の長さは、 $1.25 < \bar{Ma} < 1.4$ の領域において、単一噴流 TP 6 M, TP 9 M より小さく現れている。また、噴流 6 M の擬似衝撃波の長さは、 $\bar{Ma} > 1.4$ で単一噴流 TP 6 M より大きく現れているが、図 4 の TP 6 M-4 M-D 4 の噴流 6 M よりかなり低く現れている。これは、図 3 (c)~(e) に見られるように、TP 6 M-9 M-D 4 の大きい噴流 9 M の第 2 セルと小さい噴流 6 M の第 3 セルの過圧縮域に形成される衝撃波の位置が一致し、より干渉が激しくなり、噴流径の小さい 6 M の振動が大きくなるからである。なお、 $\bar{Ma} = 1.7$ 以上で噴流 6 M が、同径平行2噴流 TP 6 M-D 4 より大きく現れるのは、噴流の振動が抑制されるからである。

噴流 9 M では、擬似衝撃波の長さは $\bar{Ma} > 1.5$ の領域で単一噴流 TP 9 M よりいくぶん大きく現れる傾向が見られるが、干渉の影響は少ない。

4・2・2 軸間距離の影響 図 6 に供試管 TP 6 M-4 M の軸間距離 l を種々変化した場合の無次元の擬似衝撃波の長さを示す。軸間距離 l/d が 4 以下の D 3, D 4 の場合には、振動が抑制されるために単一噴流の場合と比較して擬似衝撃波の長さは長くなり、D 6 付近では、逆に短くなる。 $l/d = 8$ の 6 M-D 8 では、軸間距離が大きいために干渉の影響が弱くなり、 $\bar{Ma} > 1.6$ で単一噴流の擬似衝撃波の長さとはほぼ一致する。なお、ここには示していないが、TP 6 M-4 M の噴流径の小さい 4 M の擬似衝撃波の長さは、いずれの軸間距離でも 6 M のものよりも全体的に小さく現れるが、6 M と類似の傾向が見られる。したがって、軸間距離の違いが擬似衝撃波の長さに及ぼす影響は、比較的軸間距離

図 6 軸間距離の違いによる擬似衝撃波の長さ (TP 6 M-4 M)

の小さい場合に見られるが、噴流径の違いによる特性の相違はほとんど認められない。なお、ここには示していないが、TP 6 M-9 M の擬似衝撃波の長さ X_L/d は、TP 6 M-4 M と比較すると全体的にかなり短くなるもののほぼ類似の傾向が見られ、軸間距離の小さいものほど干渉の影響を強く受ける。

4・3 等速度線図 図 7 (a)~(d) に供試管 TP 6 M-4 M-D 4 の $\bar{Ma} = 2.11$ における Y-Z 断面内の無次元の等速度線図 U/U_0 を示す。縦軸、横軸の距離 Z, Y および出口からの距離 X は、供試管 6 M の内径 d で無次元化している。図 7 (a) に示す $X/d = 5$ では、互いの噴流境界は接触せず、それぞれ独立した流れとなっている。図 7 (b) に示す $X/d = 10$ 付近では、2噴流は合流し、下方の直径の小さい 4 M の噴流中央付近の流れは、上方の直径の大きい 6 M の噴流側へ偏向し、誘引される。図 7 (c) に示す $X/d = 20$ 付近では、4 M の噴流中心位置がさらに 6 M 側に片寄った分布となり、6 M の噴流に合流していく。さらに下流では、図 7 (d) の $X/d = 30$ に示すように、4 M の噴流中心は消滅し、6 M を主流とする非対称の単一噴流へと移行するが、6 M の噴流中心付近の流れの偏向は小さく、干渉の影響は少ない。同径平行2噴流 TP 6 M-D 4 と比較すると、TP 6 M-4 M-D 4 は、縦方向の振動が小さいので鉛直 Z 軸方向への拡散は少ないが、水平 Y 軸方向へは全般的に大きく現れている。

図 8 (a)~(d) に供試管 TP 6 M-9 M-D 4 の $\bar{Ma} = 1.78$ における Y-Z 断面内の無次元の等速度線図 U/U_0 を示す。距離 X, Y, Z は、供試管 6 M の内径 d で無次元化している。TP 6 M-4 M-D 4 の等速度線図と同様に、図 8 (a) の $X/d = 5$ では、独立した流れと

図 7 Y-Z 平面内の等速度線図 (TP 6 M-4 M-D 4, $\bar{Ma} = 2.11$)

図 8 Y-Z 平面内の等速度線図
(TP 6 M-9 M-D 4, $\bar{Ma}=1.78$)

図 9 鉛直方向の速度分布
(TP 6 M-4 M-D 4, $\bar{Ma}=2.07$)

なる。図 8 (b), (c) の $X/d=10$ および 20 に示すように、下流に行くに従い、6 M の噴流中心付近の流れは、直径の大きい 9 M の噴流側へ誘引される。さらに図 8 (d) に示す $X/d=30$ になると、6 M の噴流中心は消滅し、9 M を主流とする単一噴流となる。

4.4 鉛直方向および軸上での速度分布 図 9 に供試管 TP 6 M-4 M-D 4 の $\bar{Ma}=2.07$ における鉛直方向の無次元の速度 U/U_0 の分布を示す。 $X/d=0.1$ の中心軸上 $Z/d=\pm 2$ の中央部のくぼみは、管出口直後の流れの急膨張のために、それぞれの噴流端での加速がより大きくなったために生じたものである⁽⁵⁾⁽⁹⁾。しかし、 $X/d=1$ 付近の位置での速度のくぼみは、図 2 に見られるような噴流中心部のスリップ面の影響で、圧力減少が生じたことに起因している⁽⁹⁾。 $X/d=10$ 付近から、合流のために $Z/d=0$ 軸上の速度は上昇し、また、直径の小さい 4 M の噴流の速度分布は、下流に向かうにつれて一様な分布となる。

図 10 に供試管 TP 6 M-4 M-D 4 の $\bar{Ma}=2.05$ における供試管中心軸上の無次元の速度 U/U_0 の分布を示す。距離 X は、それぞれの供試管の内径 d で無次元

図 10 供試管中心軸上での速度分布
(TP 6 M-4 M-D 4, $\bar{Ma}=2.05$)

化している。各中心軸上の速度は、管出口直後の急膨張によって急激に上昇し、 $X/d=1\sim 2$ 付近で、スリップ面の発生のために急激に低下する。以後、過膨張、過圧縮域でそれぞれ増大、減少を繰返しながら次第に上昇して、下流域で減衰する。直径の小さい 4 M の噴流は、 $X/d=13$ 以降で直線的に減衰するが、6 M の噴流はかなり下流域まで減衰しにくい傾向が見られる。

5. 結 言

2 個の平行な異径直円管 TP 6 M-4 M, TP 6 M-9 M より噴出される不足膨張噴流の干渉特性についての実験と同径平行 2 噴流 TP 6 M-D 4 との比較検討を行い、次の知見を得た。

(1) 異径平行 2 噴流では、振動が抑制されるために、同径平行 2 噴流よりも下流域まで超音速流れが存在する。

(2) 異径平行 2 噴流の各噴流の擬似衝撃波の長さは、単一噴流や同径平行 2 噴流よりも大きく現れる傾向にあるが、特に、径の小さい組合せの供試管 TP 6 M-4 M-D 4 ほどその長さは大きい。

(3) 2 噴流の軸間距離の違いが擬似衝撃波の長さに及ぼす影響は、軸間距離の小さいもののほど大きく、その長さも大きく現れる傾向にある。

文 献

- (1) Soga, T., ほか 2 名, *Proc. 14th Int. Symp. Rarefied Gas Dyn.*, 1 (1984), 485.
- (2) McDermott, W. and Hurlbut, F. C., *Phys. Fluids*, **27**-1 (1984), 60.
- (3) 藤本・ほか 2 名, 機論, **53**-486, B (1987), 400.
- (4) 藤本・ほか 2 名, 機論, **53**-492, B (1987), 2337.
- (5) 児島・松岡, 機論, **54**-503, B (1988), 1560.
- (6) 児島・松岡, 機論, **54**-506, B (1988), 2738.
- (7) 児島・松岡, 機論, **55**-509, B (1989), 188.
- (8) 児島・松岡, 機論, **52**-477, B (1986), 2021.
- (9) 児島・松岡, 機論, **53**-495, B (1987), 3146.