複数の平行超音速自由噴流が干渉した流れ場の解析*

新美 智秀^{*1}, 藤本 哲夫^{*1}, 田老 伸匡^{*2}

Analysis of Flow Fields of Interacting Parallel Supersonic Free Jets

Tomohide NIIMI, Tetsuo FUJIMOTO and Nobumasa TAOI

In this study, the flow fields of two, three or four interacting parallel supersonic free jets are studied by flow visualization using the planar-laser-induced fluorescence of iodine molecules seeded in the test gas. Centers of orifices are set on a line, vertexes of a triangle or square. The flow fields are visualized on the plane including the jet centerlines and in the cross sections vertical to the centerlines. The flow field structures are clarified using various visualized pictures for each geometrical arrangement of the orifices. In particular, three-dimensional structures of the flow fields do not tend downstream to the structures which are expected from the arrangement of the orifices.

Key Words: Compressible Flow, Rarefied Gas, Shock Wave, Supersonic Flow, Flow Visualization, Laser-Induced Fluorescence, Free Jets, Interaction

1. 緒 言

複数の超音速自由噴流が干渉した流れ場は、宇宙空間での推進ジェット、混合気体の質量分離、分子線エピタキシー技術等と関連して従来から研究されてきた。最近では、半導体薄膜の大量生産化技術として、CVD による均質で高精度な大きい薄膜の製造が望まれ、反応性ガスを多くのオリフィスから超音速自由噴流として噴出させる方法が提案されている。このように、複数の超音速自由噴流が干渉した流れ場は、ますます工業的にも重要視され、その流れ場構造の解明が急がれている。

著者らは、ノズル中心軸間角度が $45^\circ \sim 180^\circ$ をなす二つの超音速自由噴流が干渉した流れ場を可視化し、その三次元構造を詳細に解析した^{(1)~(3)}。これにより、二次的に形成される衝撃波によって囲まれたセル構造や時間的に流れ場が変動する現象を明らかにした。また、二つの噴流が対向しておかれた場合には流れ場の構造が貯気室圧力の膨張室圧力に対する比と貯気室のクヌッセン数に関して急激に変化する跳躍現象、およ

び圧力比に関する流れ場構造の履歴現象を明らかにした⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

二つの平行な超音速自由噴流が干渉した流れ場については、飛しょう体の推進ジェットに関連した報告が行われている。Dankert-Koppenwallner⁽⁶⁾⁽⁷⁾は、二つの平行な超音速自由噴流の干渉を浸透クヌッセン数 (Penetration Knudsen Number) を用いて分類するとともに、干渉領域のマッハ数分布および圧力分布を測定した。これにより、浸透クヌッセン数が小さい場合には、干渉領域が衝撃波によって囲まれ、この内部で下流に向かってマッハ数が増加し、圧力が減少することを確認した。Soga ら⁽⁸⁾は、この流れ場を電子線蛍光法を用いて可視化し、流れ場の構造を解析するとともに密度分布と回転温度分布を計測している。しかし、流れ場の構造、特に衝撃波系の三次元構造は詳細に調査されていない。

本研究では、試料気体中に混入したよう素の PLIF (Planar Laser Induced Fluorescence) を用いて複数の平行な超音速自由噴流が干渉した流れ場を可視化し、流れ場の複雑な衝撃波構造の詳細を明らかにすることを目的としている。超音速自由噴流が干渉した流れ場は、二つまたは三つのオリフィスが直線上に配置された場合、三つのオリフィスが正三角形の頂点に配

* 原稿受付 平成 5 年 4 月 8 日。

^{*1} 正員, 名古屋大学工学部 (〒464-01 名古屋市中種区不老町)。^{*2} 名古屋大学大学院。

置された場合、四つのオリフィスが正方形の頂点に配置された場合について調査した。流れ場は、オリフィス中心軸を含む断面とオリフィス出口面に平行な多くの断面について可視化し、それぞれの流れ場についての詳細な流れ場構造が明らかにされる。特に、オリフィスが直線上に配置された場合のオリフィス間距離に依存した流れ場構造の変化、オリフィスが正三角形または正方形に配置された場合の下流における特徴的な断面構造を明らかにした。

2. 実験装置および実験方法

本研究で用いた実験装置の概要を図1に示す。本研究では、試料気体としてアルゴンを用いた。試料気体は、可変リークバルブを通して貯気室へ導かれ、ここで酸化したよう素($20 \pm 1^\circ\text{C}$ で蒸気圧 26.5 Pa)と混合する。この混合気体は、膨張室内の複数のオリフィス(直径 $D=0.5\text{ mm}$)から噴出し、超音速自由噴流を形成するとともに互いに干渉する。オリフィスは厚さ 1 mm のジュラルミンを機械加工して製作した。オリフィスの配置は図2に示したように、二つ[図2(a)]または三つ[図2(b)]のオリフィスを直線上に配置、三つのオリフィスを正三角形の頂点に配置[図2(c)]、四つのオリフィスを正方形の頂点に配置[図2(d)]した4種類のオリフィス配置を用意した。オリフィス間距離 L は、直線上配置では、二つのオリフィスの場合には $L/D=1.2, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0$ 、三つの場合には $L/D=2.0, 4.0$ とした。また、正三角形および正方形の頂点にオリフィスを配置した場合には、正三角形および正方形

形の中心からオリフィス中心までの距離 r を $r/D=2.0$ とした。

膨張室は油回転ポンプを用いて排気される。貯気室の圧力 P_s は、可変リークバルブにより 2.67~40.0 kPa、膨張室の圧力 P_e は、バルブの開度を調整することにより 0.133~186.6 Pa の間で設定される。流れ場の構造を決めるパラメータとして、おもに貯気室圧力の膨張室圧力に対する比 P_s/P_e を用いた。圧力の測定には、貯気室は水銀 U 字管マンオメータ、膨張室はダイアフラム式真空計を用いた。また、貯気室の温度 T_0 は 300 K に設定した。

流れ場の可視化に利用したレーザは、エキシマレーザ(LUMONICS TE-431 T, XeC1 にて発振)励起の色素レーザ((LUMONICS HYPERDYE-300)である。レーザ光は、レンズを通して絞った後、パルスステージ上のミラーによりシート状にされる。レーザ光は、11 mm の幅を約 1 min で可視化平面を掃引する。

流れ場は、レーザシート面から約 50 cm のところに設置したスチルカメラによって撮像した。カメラには、フィルム面上でほぼ等倍に結像するように望遠レンズ(200 mm, F 2.5)およびベローズを組合せ、さらにレーザ光を遮断するためのフィルタ(SO-56)を取付けた。フィルムには ASA 3200 を使い、増感現象を行った。なお、オリフィス出口面に平行な断面は、膨張室内に設置したミラーにより断面画像を反射させることで撮像した。

流れ場の座標系は、図3に示すように設定した。すなわち、直線上配置のオリフィスの場合には直交座標系、正三角形および正方形配置の場合には円筒座標系

図1 実験装置概略図

図2 オリフィス配置図

とし、いずれの場合も配置されたオリフィスの幾何学的な中心からオリフィス出口面に垂直に Z 軸を設定した。

3. 実験結果および考察

3・1 オリフィスが直線上に配置された場合 図 4 に $L/D=4.0$, $P_s/P_b=200$ において二つの超音速自由噴流が干渉した場合の $X-Z$ 平面における可視化写真、およびその構造を示す。両噴流の出口直後に形成された、たる形衝撃波 OA が幾何学的対称面近傍で反射し、斜め衝撃波 AB を形成する。この衝撃波はたる形衝撃波 OC とともに下流でマッハ反射し、垂直衝撃波 BC を形成する。さらに、三重点 B から反射衝撃波 BE が発生し、この反射衝撃波も下流で他方の噴流の反射衝撃波 $B'E'$ とともにマッハ反射し、垂直衝撃波 EE' を形成する。対称面近傍には、斜め衝撃波 AB と $A'B'$ によって囲まれた領域が存在する。この噴流の干渉の結果として形成される衝撃波で閉じられた領域を第 2 セルと呼び、噴流直後に形成される衝撃波によって囲まれた領域(第 1 セル)と区別する。

図 5 は図 4 (a) に示した矢印の断面($X-Y$ 平面、オリフィス出口面に平行な断面)を可視化した結果であり、図 5 の 1, 2 は図 4 (a) の矢印に付した数字の断面に対応している。比較的オリフィスに近い断面は ϕ の形をした構造(以下では ϕ 構造と呼ぶ)を呈し、 Y 軸方向に強い吹出しが観察できる。この吹出しは、図 6 の流れ場の三次元構造図に示したように、 $X-Y$ 平面に平行な断面内における噴流境界(Jet Boundary)とたる形衝撃波(Barrel Shock)の間の領域の速度によって説明できる。すなわち、この領域は超音速を保持しており、速度は $X-Y$ 平面に平行な断面内では Z 軸に向かう成分と Y 軸成分を有している。両噴流の干渉の結果として、前者は干渉領域で相殺され、 Y 軸方向への強い吹出しが形成される。

(a) オリフィスが直線上に配置の場合 (b) オリフィスが正三角形または正方形配置の場合

図 3 流れ場の座標系

$L/D=4.0$ の場合には $X-Y$ 平面に平行な断面の構造は、下流まで ϕ 構造を保つが、 L/D が小さくなると、すなわち両噴流の干渉開始点がオリフィスに近づくると下流でその構造が変化する。図 7 は $L/D=2.0$, 圧力比は図 4 と同じ $P_s/P_b=200$ の場合の $X-Z$ 平面 [図 7 (a)] および矢印で示した断面の可視化写真 [図 7 (b)] である。図 7 (b) からわかるように、下流で Y 方向に伸びた平面的な流れ場構造へと漸近する。この結果は、同一の P_s/P_b の場合、 L/D が小さくなるほど顕著である。これは、 L/D が小さくなることにより、両噴流が接近し、吹出し内部の Y 軸方向速度成分が

(a) $X-Z$ 平面における流れ場の可視化

(b) $X-Z$ 平面における流れ場の構造

図 4 二つのオリフィスが直線上に配置された場合の干渉する超音速自由噴流 ($L/D=4.0$, $P_s/P_b=200$)

1 2

図 5 図 4 (a) の断面の可視化 ($X-Y$ 平面に平行な断面)

より大きくなることに起因している。 L/D が一定の場合に、 P_s/P_b が大きくなると同様の理由から平面的な流れへの遷移は顕著となる。

直線上に三つのオリフィスが配置された場合も、 L/D が比較的大きいか、 P_s/P_b が比較的小さい場合には各オリフィス間に Y 方向の吹出しが形成され、二つの噴流が干渉した場合と同様に下流でも上流と同じ構造を保つ。しかし、 L/D が小さくなるか P_s/P_b が大きくなると、図 8 ($L/D=2.0$, $P_s/P_b=160$) に示すように、下流に向かって二つの吹出しが徐々に接近し、ついには図 8 (b)-2 のように両吹出しは一体化する。こ

れは、吹出しが上述のように超音速を保っており、両吹出しの間が負圧となることに起因しているものと思われる。この結果を換言すれば、 X 軸上に配置されたオリフィスから噴出した三つの噴流が、干渉によって下流で Y 軸方向の平面的な流れに遷移することを示している。これは、Teshima ら⁽⁹⁾ による横長オリフィス(スリット)から噴出した超音速自由噴流の結果と一致し、オリフィス間距離が比較的近い場合には、直線上に配置された多数のオリフィスから噴出した噴流の干渉した流れ場は、下流では一つの横長オリフィスから噴出した流れ場で近似できることがわかる。

3・2 オリフィスが正三角形または正方形の頂点に配置された場合

オリフィスが正三角形の頂点に配置された場合($r/D=2.0$)の $\theta=0$ の断面とオリフィス出口面に平行な断面における可視化写真を図 9 に示す。図 9 (a) からわかるように、 P_s/P_b が比較的大きい場合には、三つの噴流の干渉によって Z 軸を中心とした第 2 セルが形成され、下流でこの第 2 セルが大きく成長することがわかる。また、図 9 (b) からわかるように、第 2 セルは上流では噴流間の高密度な干渉領域として存在するが、下流では第 2 セルが成長し、

図 6 流れ場の構造図(二つのオリフィスが直線上配置)

(a) $X-Z$ 平面における流れ場の可視化

(b) 図(a)の矢印断面の可視化($X-Y$ 平面に平行な断面)

図 7 二つのオリフィスが直線上に配置された場合の干渉する超音速自由噴流($L/D=2.0$, $P_s/P_b=200$)

(a) $X-Z$ 平面における流れ場の可視化

(b) $Y-Z$ 平面における流れ場の構造

図 8 三つのオリフィスが直線上に配置された場合の干渉する超音速自由噴流($L/D=2.0$, $P_s/P_b=160$)

オリフィス間に強い吹出しを伴う構造となる。この強い吹出しの形成過程は 3・1 節で述べた理由によるが、その方向は $\theta=60, 180, 300^\circ$ にあり、オリフィスの配置 ($\theta=0, 120, 240^\circ$) と 60° 異なった方向に現れる。

図 10 は、オリフィスが正方形の頂点に配置された場合 ($r/D=2.0$) の $\theta=0$ の断面とオリフィス出口面に平行な断面における可視化写真である。この場合も、オリフィスが正三角形の頂点に配置された場合と同様に、第 2 セルが下流で優勢となり、オリフィス配置と 45° 異なった方向に強い吹出しが現れる。

(a) $\theta=0$ 平面における流れ場の可視化

(b) Z 軸に垂直な断面における流れ場の構造

図 9 三つのオリフィスが正三角形の頂点に配置された場合の干渉する超音速自由噴流 ($r/D=2.0$, $P_s/P_0=160$)

4. 結 論

複数の平行な超音速自由噴流が干渉した流れ場を PLIF 法により可視化し、その特徴的な流れ場構造を解析した。以下に、 L/D または r/D が比較的小さく、 P_s/P_0 が比較的大きい場合に得られた特徴的な流れ場構造について結論としてまとめる。

(1) オリフィスが直線上に配置された場合には、各噴流間に第 2 セルが形成され、Y 軸方向への強い吹出しが現れる。また、下流ではオリフィス配置に直交する平面的な流れに漸近し、オリフィス間距離が小さい場合には横長オリフィス(スリット)から噴出した流れ場で近似できる。

(a) $\theta=0$ 平面における流れ場の可視化

(b) Z 軸に垂直な断面における流れ場の構造

図 10 四つのオリフィスが正方形の頂点に配置された場合の干渉する超音速自由噴流 ($r/D=2.0$, $P_s/P_0=128$)

(2) オリフィスが正三角形または正方形の頂点に配置された場合には、下流において第2セルが支配的となり、各噴流間に強い吹出しが形成される。

本研究は文部省科学研究費補助金[試験研究(B), 一般研究(C)]の援助を受けたことを付記し謝意を表す。また、実験および図版の作成に際しご協力を得た当時学部生 田中秀人君に感謝する。

文 献

- (1) 藤本・新美・長田, 自由噴流の干渉に関する研究, 機論, 53-486, B (1987), 400.
- (2) 藤本・新美・長田, 自由噴流の干渉に関する研究(第2報, 衝撃波系の三次元構造), 機論, 53-492, B (1987), 2377.
- (3) Fujimoto, T. and Niimi, T., Three Dimensional Structures of Interacting Freejets, *Space-Related Studies*, AIAA, (1988), 391.
- (4) 新美・藤本・原・井嶋, LIF法による対向する超音速自由噴流の構造解析, 機論, 57-539, B (1991), 2233.
- (5) 新美・藤本・井嶋・田老・青木, 貯気室圧力の異なる超音速自由噴流が干渉した流れ場の研究(LIF法による可視化と構造解析), 可視化情報, 11, Supple, 2 (1991), 43.
- (6) Dankert, C. and Koppenwallner, G., Experimental Study of the Interaction Between Two Rarefied Free Jets, *Proc. 14th Int. Symp. Rarefied Gas Dyn.*, 1 (1984), 477, Univ. Tokyo Press.
- (7) Dankert, C. and Koppenwallner, G., Influence of Penetration Knudsen Number on Two Rarefied Free Jets, *DFVLR IB 222-84 A 23* (1984).
- (8) Soga, T., Takanishi, M. and Yasuhara, M., Experimental Study of Interaction of Underexpanded Free Jets, *Proc. 14th Int. Symp. Rarefied Gas Dyn.*, 1 (1984), 485, Univ. Tokyo Press.
- (9) Teshima, K. and Nakatsuji, H., Structures of Freejets from Slit Orifices, *Proc. 15th Int. Symp. Rarefied Gas Dyn.*, II (1986), 595, B. G. Teuber Stuttgart.