自由噴流の干渉に関する研究*
(第3報, 貯気室圧力の異なる自由噴流が干渉した流れ場の構造)藤本 哲夫^{*1}, 新美 智秀^{*1}
長田 裕司^{*2}, 清水 宏文^{*3}A Study on Interacting Free Jets
(3rd Report, Structures of Interacting Free Jets with Different Source Pressure)Tetsuo FUJIMOTO, Tomohide NI-IMI,
Hiroshi OSADA, and Hirofumi SHIMIZU

Three-dimensional structures of two interacting free jets with different source pressure are studied by flow visualization. Angles between jet axes are set at $\theta=45^\circ$ and 180° . Experiments are carried out for various source pressure ratios and various ratios of the source pressure to the pressure in the expansion chamber. For $\theta=45^\circ$, many types of flow field appear with respect to the source pressure ratio and the structures of these flow fields are classified into several types according to their shock systems. Characteristic three-dimensional structures and a contact surface with bends in an interacting region are explained in detail. For $\theta=180^\circ$, structures of the flow field are divided roughly into four types depending on the condition of the source pressure and the pressure in the expansion chamber. Specifically, stable and unstable flows in the interacting region are found for the equal pressure ratios.

Key Words: Compressible Flow, Rarefied Gas, Interaction, Free Jets, Source Pressure, Shock Wave, Sonic Nozzle, Flow Visualization, Laser Induced Fluorescence

1. 緒 言

著者らは、前報までに同一圧力の試料気体(アルゴン)を二つの同形状の音速ノズルを通して膨張させ、自由噴流の干渉により形成される流れ場の構造を可視化により解析した。第1報⁽¹⁾では、ノズル中心軸を含む平面に関して流れ場を可視化し、ノズル中心軸間角度(θ)が 45° , 90° , 135° , 180° の各場合について貯気室圧力の膨張室圧力に対する比に依存した流れ場の構造を解析した。第2報⁽²⁾では、流れ場がノズル中心軸間角度を二等分する面(対称面)に関して対称となる $\theta=90^\circ$ 以下の場合を対象として、互いに垂直な3平面の可視化から非常に特徴的な流れ場の三次元構造を解析した。

一方、貯気室圧力の異なる自由噴流の干渉した流れ場にも興味を示されている。例えば、分子線エビタキシーによるGaAs薄膜の製造に関して、Gaに比べてAsの分子線を十分強くする方法が試みられており⁽³⁾、貯気室圧力の異なる自由噴流の干渉した流れ場の構造

の解明は、この技術の性能向上に重要であると考えられる。しかし、これらの流れ場に関する報告はない。

本報では、 $\theta=45^\circ$ と 180° の場合に関して、貯気室圧力の異なる二つの自由噴流を干渉させ、二つの噴流の貯気室圧力比および貯気室圧力の膨張室圧力に対する比に依存した流れ場の構造を可視化により解析した。 $\theta=45^\circ$ の場合に関しては、二つのノズル中心軸を含む平面内の干渉領域近傍の流れ場の構造およびノズル中心軸を含む平面と対称面の両者に垂直な平面内の流れ場の構造をそれぞれ数種類に分類し、その三次元構造を明らかにする。 $\theta=180^\circ$ の場合に関しては、貯気室圧力比と、貯気室圧力の膨張室圧力に対する比に関して、その流れ場を大きく四つに分類するとともに、流れ場が時間的に不安定になる現象についても報告する。

なお、流れ場の可視化は試料気体(アルゴン)に混入したヨウ素のレーザ誘起けい光を用いた。

2. 実験装置および実験方法

実験装置は、二つの音速ノズルに通ずる貯気室を個別に設定したことを除いて前報⁽¹⁾⁽²⁾と同じである。

貯気室圧力(ノズルA: P_{sa} , ノズルB: P_{sb} , $P_{sa} \geq P_{sb}$)は可変リークバルブの調節により 0.52×10^3

* 平成元年3月11日 東海支部第38期総会講演会において講演、原稿受付 昭和63年5月9日。

^{*1} 正員, 名古屋大学工学部 (〒464 名古屋市千種区不老町)。

^{*2} 正員, 豊田中央研究所 (〒480-11 愛知県愛知郡長久手町)。

^{*3} 名古屋大学大学院。

$\sim 1.33 \times 10^4$ Pa (40~100 Torr), 膨張室圧力(P_b)は, バルブの開度の調節により $1.33 \sim 1.33 \times 10^2$ Pa (0.01~1 Torr)の範囲で設定した。なお, 貯気室圧力比(P_{sa}/P_{sb})は, 1.0~5.0 の間で設定した。

二つのノズルの出口内径 D はともに 0.513 mm である。二つのノズルの中心軸の交点からノズル先端までの距離 L ($\theta=180^\circ$ の場合は, ノズル先端間距離を二等分する点からノズル先端までの距離)のノズルの出口内径 D に対する比は, $\theta=45^\circ$ の場合は $L/D=7.6$, $\theta=180^\circ$ の場合は $L/D=11.1$ (L はノズル先端間距離の半分)に設定した。

$\theta=45^\circ$ の場合に関する流れ場の座標系を図 1 に示すように設定した。すなわち, この二つのノズルの中心軸を含む平面と対称面との交線を X 軸とし, これに垂直に前者の面内に Y 軸, 後者の面内に Z 軸を設定した。

3. 実験結果および考察

3.1 $\theta=45^\circ$ の場合の干渉した流れ場の構造

3.1.1 X - Y 平面における貯気室圧力比に依存した流れ場の構造 図 2 (a)~(h) にノズル A の貯気室圧力の膨張室圧力に対する比 $P_{sa}/P_b \approx 250$ において, $\theta=45^\circ$ で自由噴流が干渉した場合の貯気室圧力比(P_{sa}/P_{sb})に依存した X - Y 平面における流れ場の全体像を示す。 $L/D (=7.6)$ および貯気室圧力比が一定の場合には, $P_{sa}/P_b \approx 100$ 以上 (干渉開始点がノズル直後にある場合) において, P_{sa}/P_b に関する流れ場の構造は定性的に変わらない。

図 2 (a) から知れるように, $P_{sa}/P_{sb}=1.0$, すなわち両噴流の貯気室圧力が同一の場合には, 前報⁽¹⁾⁽²⁾で述べたように流れ場は幾何学的対称面に関して対称となる。また, ノズル直後に形成される第 1 のセルの垂直衝撃波より下流の領域では, Z 方向(紙面に垂直な方

向)に広がる平面的な流れに遷移する⁽²⁾。しかし, 図 2 (b)~(f) から知れるように, 貯気室圧力比の増加に伴い流れ場の対称面に関する非対称性が大きくなり, 流れ場は次第にノズル A の噴流が支配的となる。さらに, ノズル A の直後に形成される第 1 のセルの下流は平面的な流れに遷移せず, 単一の自由噴流のように同形状のセルが繰返し形成される流れ場となり, 貯気室圧力比の増加とともに, このセルは大きくなる。図 2 (g), (h) は, 図 2 (d) の圧力条件下で二つの噴流を別々に可視化した例である。二つの噴流の境界面は, 両者のこの面に沿った速度, 密度, および温度の異なる不連続面, すなわち接触面(Contact Surface)である。図 2 (e), (f) のように貯気室圧力比の大きい場合には, この接触面は密度の差に対応してけい光強度の差として明りょうに観察することができる。これらの図から, 接触面が何度も折れていることがわかる。

以下では, 貯気室圧力比に依存した流れ場の構造, 特に干渉領域近傍の流れ場の構造を, 図 3 に示すように大きく四つ(Type 1~4)に分類し, その構造について詳述する。なお, 図中の破線は接触面を示す。

a. Type 1 $P_{sa}/P_{sb}=1.0$, すなわち両噴流の貯気室圧力が同一の場合には [図 2 (a) 参照], 図 3 (a) に示すように流れ場は幾何学的対称面に関して対称となり, 対称面近傍に衝撃波によって囲まれた第 2 のセルが形成される。第 2 のセルは, ノズル直後に形成された第 1 のセルのたる形衝撃波(Barrel Shock)oa が干渉面近傍の高密度領域で反射された斜め衝撃波 (Oblique Shock)ab と第 1 のセルの垂直衝撃波 bc の三重点 b から発生した反射衝撃波 bd によって形成されたものである。さらに, P_{sa}/P_b の比較的大きい場合には第 2 のセルは内部が超音速のため下流に垂直衝撃波 de を形成し, 点 d, e は三重点となる⁽²⁾。

b. Type 2 貯気室圧力比が 1.0 をわずかに超えると [図 2 (b) 参照], 図 3 (b) に示すようにノズル B の噴流の三重点 a から発生した反射衝撃波 ac が接触面と交わり, 両者は点 b でともに折れる。この圧力条件下では, 第 2 のセルは内部に不連続面を有しているものの, 依然として下流に垂直衝撃波 cd を有する構造を呈している。

c. Type 3 貯気室圧力比がさらに大きくなると [図 2 (c) 参照], 図 3 (c) に示すようにノズル B の噴流の三重点 a から発生した反射衝撃波 ac は, 接触面と点 b で交差して折れ, さらにノズル A の噴流の三重点 d から発生した反射衝撃波 de と点 c で交差する。この場合は, 第 2 のセルは下流に垂直衝撃波を伴わない構造となる。

図 1 流れ場の座標系 ($\theta=45^\circ$)

d. Type 4 貯気室圧力比が2.0以上になると[図2(d), (e), (f)参照]図3(d)に示すようにノズルBの噴流の三重点cから発生した反射衝撃波cbは、接触面と点dで交差して折れ、さらにノズルAの噴流の斜め衝撃波aeと交わる。斜め衝撃波aeは点bで折れてbeとなる。また、接触面は点dで折れ、さらにノズルAの噴流の三重点eから発生した反射衝撃波ehと点gで交差し、両者はこの点でともに折れる。前述したように、この貯気室圧力比の場合は、干渉領域の下流の流れ場が、ほとんどノズルAの噴流によ

って形成される。

以上から、干渉領域の流れ場の構造は、ノズルBの噴流の三重点から発生した反射衝撃波が重要な役割を果たしていることがわかる。

3・1・2 Y-Z平面に平行な面内における流れ場の構造 図4に $P_{sa}/P_{sb}=4.9$ の場合のY-Z平面に平行な面内における流れ場の可視化写真を示す。図(a)の写真の下に付した番号は、図(b)の写真の下に付した番号の矢印の断面を可視化したことを示す。また、Y-Z平面に平行な面内における代表的な三つの流れ

(a) $P_{sa}/P_{sb}=1.0$, $P_{sa}/P_0=247$

(b) $P_{sa}/P_{sb}=1.25$, $P_{sa}/P_0=253$

(c) $P_{sa}/P_{sb}=1.43$, $P_{sa}/P_0=250$

(d) $P_{sa}/P_{sb}=2.0$, $P_{sa}/P_0=250$

(e) $P_{sa}/P_{sb}=3.1$, $P_{sa}/P_0=254$

(f) $P_{sa}/P_{sb}=4.9$, $P_{sa}/P_0=251$

(g) 圧力条件は(d)と同一

(h) 圧力条件は(d)と同一

図2 $\theta=45^\circ$ で干渉した自由噴流のX-Y平面における全体像($L/D=7.6$)

場の構造を図5に示す。

比較的ノズルに近い領域では、貯気室圧力の同じ場合には非常に特徴的な ϕ 形の構造となる⁽²⁾が、貯気室圧力が異なると図5(a)に示すようなたる形衝撃波と斜め衝撃波によって形成された大きさの異なる半円状

図3 $\theta=45^\circ$ で干渉した自由噴流のX-Y平面における流れ場の構造 ($L/D=7.6$, $P_{sa}/P_o \geq 100$)

のセルが接した構造を呈する。また、二つの噴流の干渉により、Z方向(紙面の上下方向)の速度成分を有した強い吹き出しが形成される。

図4(a)-1, 2, 3に示すようにノズルBの噴流の垂直衝撃波[図3(d)ci]からノズルAの噴流の垂直衝撃波[図3(d)ef]までの区間では、図5(b)のように接触面を境にしてノズルAの噴流のセルとノズルBの噴流の垂直衝撃波で圧縮された高密度領域が接する構造となる。また、図4(a)および図5(b)からノズルAの噴流の斜め衝撃波efは、この区間でほぼ平面を保っていることがわかる。接触面abcdは、斜め衝撃波の端点eとfの近傍の点bとcで折れ、bcの部分は斜め衝撃波efと平行になる。点bとcで接触面が折れるのは、ノズルAの噴流のたる形衝撃波と噴流境界の間の領域の気体が超音速を保ち、点bとcの近傍でノズルBの噴流の気体よりも大きな運動量を有していることに起因している。

ノズルAの噴流の垂直衝撃波より下流の領域では、図4(a)-4および図5(c)に見られるように、接触面がW形に曲がることわかる。貯気室圧力比の増加とともに、接触面の点b, cにおける折れ角は大きくなる。また、ノズルBの噴流が、ノズルAの噴流のたる形衝撃波と噴流境界の一部を形成しているように見える。これは、前述したように貯気室圧力比の増加に伴ってノズルAの噴流が支配的となることに対応している。

3.2 $\theta=180^\circ$ の場合の干渉した流れ場の構造

二つの噴流の貯気室圧力が等しい場合には、ノズル先端間距離を二等分する面(対称面)に関して対称な構造と、一方の噴流がノズルに向かって圧縮された非対称な構造が存在することを前報⁽¹⁾で述べた。

貯気室圧力比(P_{sa}/P_{sb})が異なる場合には、貯気室圧力比、ノズルA(またはノズルB)の貯気室圧力の膨張室圧力に対する比(P_{sa}/P_o)および L/D に依存して種々の流れ場の構造が存在する。しかし、干渉した自由噴流の流れ場は、 P_{sa}/P_o が一定の場合の L/D の増減に伴う流れ場の構造変化は、 L/D が一定の場合の P_{sa}/P_o の増減に伴う構造変化と幾何学的に相似であるため、流れ場の構造の L/D に関する依存性は P_{sa}/P_o に置き替えられる。 $L/D=11.1$ の場合の種々の圧力条件下におけるノズル中心軸を含む平面内の代表的な可視化写真を図6に示す。また、これらの可視化写真から流れ場の構造を図7に示すように大きく四つ(Type 1~4)に分類した。

3.2.1 P_{sa}/P_{sb} が比較的小さい場合 P_{sa}/P_o の小さい場合には、図6(a)と図7(a)(Type 1)に示す

ような流れ場の構造となる。ノズル A の噴流はノズル B の噴流の下流に形成されたセルと干渉し、ノズル A の噴流はノズルに向かって圧縮される。また、両噴流は衝撃波を通して干渉領域によどみ領域を形成する。ノズル A の噴流の運動量がノズル B の噴流の運動量より大きいことから、ノズル A の噴流の気体はノズル

ル中心軸に垂直な方向からややノズル B に傾いた方向に曲がる。

P_{sa}/P_b の大きい場合には、図 6 (b) と図 7 (b) (Type 2) に示すような流れ場の構造となり、両噴流の第 1 のセルが干渉する。この場合もノズル A の噴流の気体はノズル中心軸に垂直な方向からややノズル B に傾いた方向に曲がる。

流れ場の可視化は、細く絞ったレーザ光を、流れ場中を約 2 ～ 4 分間掃引させることにより行っていることから、上記のいずれの場合も流れ場は時間的に安定である。

3.2.2 P_{sa}/P_{sb} が比較的大きい場合 P_{sa}/P_b の小さい場合には、図 6 (c) に示すように P_{sa}/P_{sb} が小さい場合と同じ安定な構造 [図 7 (a) (Type 1)] になる場合と、図 6 (d) と図 7 (c) (Type 3) に示すような干渉領域が判然としない振動を伴った不安定な構造が存在する。さらに P_{sa}/P_{sb} が大きい場合にも、同じ圧力条件下にもかかわらず図 6 (e) と図 7 (d) (Type 4) に示すような安定な流れ場と、図 6 (f) に示すような振動を伴った不安定な構造 [図 7 (c) (Type 3)] が存

(a) Y-Z 平面に平行な面内

(b) X-Y 平面

($P_{sa}/P_{sb}=4.9$, $P_{sa}/P_b=251$, $L/D=7.6$)

図 4 $\theta=45^\circ$ で干渉した自由噴流の Y-Z 平面に平行な面内および X-Y 平面における全体像

図 5 $\theta=45^\circ$ で干渉した自由噴流の Y-Z 平面に平行な面内における構造

在する。いずれの場合も、振動を伴った不安定な干渉領域は貯気室圧力のより高いノズル A の噴流の第 1 のセルと貯気室圧力のより低いノズル B の噴流の第 1 のセルの下流に形成されたセルが干渉した際に発生し、安定な流れ場が存在する状態でバルブを操作する

(a) $P_{sa}/P_{sb}=1.25$, $P_{sa}/P_b=100$

(b) $P_{sa}/P_{sb}=1.25$, $P_{sa}/P_b=298$

(c) $P_{sa}/P_{sb}=2.0$, $P_{sa}/P_b=100$

(d) $P_{sa}/P_{sb}=2.0$, $P_{sa}/P_b=100$

(e) $P_{sa}/P_{sb}=3.0$, $P_{sa}/P_b=150$

(f) $P_{sa}/P_{sb}=3.0$, $P_{sa}/P_b=150$

(g) $P_{sa}/P_{sb}=3.0$, $P_{sa}/P_b=302$

図 6 $\theta=180^\circ$ で干渉した自由噴流の全体像 ($L/D=11.1$)

とこの不安定な構造に遷移する。このことから、干渉領域における流れ場が準安定状態にあり、境界条件に関する外乱の付加により不安定な流れ場に遷移するものと考えられる。この不安定な流れ場は、一様流中に逆噴射する噴流が存在する流れ場と類似しており、噴流の全圧の一様流の全圧に対する比が小さい場合に不安定な流れ場になることが報告されている⁽⁴⁾。

図6(e)の流れ場は図7(d)(Type 4)に示すように、ノズルAの噴流の第1のセルの下流に形成されたセルとノズルBの噴流の第1のセルが干渉したものである。干渉領域では、両噴流が垂直衝撃波を通して圧縮、減速され、よどみ領域を形成する。さらに、よどみ領域から発生した接触面がノズルBの噴流を包むように大きく曲がる。

P_{sa}/P_b の大きい場合には、図6(g)に示すような流れ場となり、基本的には図7(b)(Type 2)の構造と同じである。ただし、 P_{sa}/P_{sb} の増加に伴い、よどみ領域から発生する接触面の曲率半径はより小さくなる。

4. 結 論

(1) $\theta=45^\circ$ で貯気室圧力比の異なる二つの自由噴流が干渉した場合には、 X - Y 平面における流れ場の構造は主として貯気室圧力比に支配され、 Y - Z 平面に平行な平面上の構造は X 位置によって変化する。これらの流れ場の構造をそれぞれ数種類に分類し、その三次元構造を明らかにした。

(2) $\theta=180^\circ$ で貯気室圧力比の異なる二つの自由噴流が干渉した場合には、貯気室圧力比、貯気室圧力の膨張室圧力に対する比（または L/D ）に関して流れ場の構造は4種類に大別される。また、貯気室圧力比が比較的大きく、貯気室圧力の膨張室圧力に対する比が比較的小さい場合には、干渉領域の不安定な流れ場が発生する。

本研究を遂行するにあたり、実験装置の製作等で協力下さった本学技官・青木延幸氏に感謝する。

なお本研究は文部省科学研究補助金〔一般研究(A)〕の援助を受けたことを付記する。

図7 $\theta=180^\circ$ で干渉した自由噴流の流れ場の構造

文 献

- (1) 藤本・ほか2名, 機論, 53-486, B(1987), 400.
 (2) 藤本・ほか2名, 機論, 53-492, B(1987), 2377.

- (3) 小宮(高橋編), 分子線エビタキシ技術, (1984), 59, 工業調査会.
 (4) 辛島・佐藤, 東京大学宇宙航空研究所報告, 11-1, A (1975), 53.

討 論

〔質問〕 西田 迪雄〔九州大学工学部〕

$\theta=180^\circ$ に対する二つの自由噴流の干渉は, 著者らも述べているように, 超音速一様流への逆噴射ジェットの問題に類似していると考えられる。逆噴射ジェット問題ではジェットの貯気槽圧と一様流の貯気槽圧との比が小さいところに, 逆噴射ジェットが振動する不安定現象が見られ, この比が重要なパラメータとして扱われている。貴論文の対抗自由噴流の不安定現象の出現に対して, どのようなパラメータを考えればよいか, ご教示願いたい。

〔回答〕 逆噴射ジェットの流れ場を支配するのは, 一様流の総圧と噴流の貯気室圧力の比である。しかし, 本研究で対象とした二つの自由噴流が干渉した場合の流れ場の構造は, 二つの貯気室圧力 (P_{sa}, P_{sb}) と膨張室圧力 P_b によって大きく支配されていると考えられる。(無次元量としては, 貯気室圧力比, P_{sa}/P_{sb} , 貯気室圧力と膨張室圧力の比, P_{sa}/P_b , および P_{sa} に基づくクヌッセン数)

現在, 流れ場構造の各 Type の発生領域を限定する目的で, 三つの圧力に関する詳細な実験を行っているが, 圧力条件の変化による各 Type 間の遷移や履歴現象が見られ, 各 Type の発生条件は非常に複雑である。

〔質問〕 奥津 良之〔山武ハネウエル(株)〕

工業プラントを対象に高圧ガス体の制御を扱う者として, 以下の点に興味をもった。ご教示願いたい。

(1) ここに示されている噴流構造の分類は, 大気圧以上の高圧ガス体を高圧力比下で膨張させる場合にも, 基本的に適用できると考えてよろしいか。

(2) 図7(a)について, 噴流の時間的な発生順序にかかわらず, 衝突部は高圧側ノズル A に近づいて安定するのか。この条件下で B 側に近づいて安定する場合はなぜないのか。

(3) $\theta=180^\circ$ の場合について, 適当な X-Y 座標

系 ($L/D, P_{sa}/P_b$ など) を用いて, 各 Type の発生条件領域, とくに振動領域を図示していただけないか。また, 図6(f)の衝突部は軸心方向以外に横方向にも振動的となっていると解釈してよいか。さらに, この振動の周波数のオーダーはどの程度であるのか。

〔回答〕 (1) 高圧ガスが大気圧中へ噴出する場合には, 本研究で対象としたような大きな圧力比 (P_{sa}/P_b) が得られず, その噴流はたる形衝撃波と垂直衝撃波によって囲まれたセルを伴わない構造となる。したがって, それらが干渉した流れ場構造には, 本研究の分類は適用できない。なお, 大気圧中へ噴出する自由噴流が干渉した流れ場に関する報告(付1)もある。

(2) 図7(a)〔Type 1〕と同じ圧力条件下で, 図7(c)〔Type 4〕も発生する。どちらの Type が発生するかに関しては, ご指摘の噴流の発生順序, すなわち初期条件にも依存する。

(3) 二つの自由噴流が干渉した場合の流れ場の構造は, 二つの貯気室圧力 (P_{sa}, P_{sb}) と膨張室圧力 P_b によって大きく支配されていると考えられる。(無次元量としては, 貯気室圧力比, P_{sa}/P_{sb} , 貯気室圧力と膨張室圧力の比, P_{sa}/P_b , および P_{sa} に基づくクヌッセン数)。

現在, 流れ場構造の各 Type の発生領域を限定する目的で, 三つの圧力に関する詳細な実験を行っているが, 圧力条件の変化による各 Type 間の遷移や履歴現象が見られ, 各 Type の発生条件は非常に複雑である。

図6(f)の不安定な流れ場は, 高感度ビジコンカメラを用いた観察から, ノズル B の噴流がノズル出口端を中心として干渉領域でふれまわる(歳差運動)ことが知れた。回転の周波数に関しては, 正確な計測はしていない。今後の検討課題としたい。

(付1) 児島・松岡, 機論, 55-509, B(1989), 188.