A111 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 (L I F 法による可視化と構造解析)

名古屋大学 工学部 新美智秀 藤本哲夫 田老伸匡* 青木延幸
三菱電機 井嶋健一

A Study on Flowfields of Two Opposed Supersonic Free Jets
with Different Source Pressure

Tomohide NI-IMI*, Tetsuo FUJIMOTO*,
Kenichi IJIMA**, Nobumasa TAOI* and Nobuyuki AOKI*

The structures of two opposed supersonic argon free jets with different source pressure are studied by flow visualization using laser-induced fluorescence of iodine molecules seeded in argon. A ratio between source pressures is ranged between 3.0 and 5.0. Experiments are carried out for various source pressures and various ratios of the source pressure to the pressure of the expansion chamber. Characteristic structures of the flow field are classified roughly into four types depending on the condition of the source pressures and the pressure of the expansion chamber. Specifically, an unstable flow in the interacting region are found. The condition of pressures is examined for each type of the flow field.

1. 緒論

半導体製造などの先端技術に希薄気体流が応用され、超音速自由噴流が干渉した流れ場に興味が示されている。

著者らは前報⁽¹⁾において、貯気室圧力の異なる2つの対向する超音速自由噴流が干渉した流れ場を試料気体(Ar)に混入したヨウ素のレーザ誘起蛍光法を用いて可視化し、流れ場の構造を大きく4つに分類すると共に、各構造の存在領域を明らかにした。

前報では、2つのノズルの貯気室圧力の比は2:1に設定したが、本報では、貯気室圧力比を3:1に設定し、同様な実験を行い、流れ場構造の貯気室圧力比への依存性を調査し、貯気室圧力比の変化による流れ場構造の変化を明らかにする。さらに貯気室圧力比を3より大きくした場合の流れ場の一つの例として貯気室圧力比を5とした流れ場についても調査する。

2. 実験方法および実験装置

実験装置の概要を図1に示す。試料気体(Ar)は、可変リークバルブを通して貯気室に入

* Faculty of Engineering, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-01.

** Mitsubishi Electric Co., 5-1-14 Yataminami, Higashi-ku, Nagoya 461.

Fig.2 Classification of the flow field structure
of the opposed supersonic free jets

つのモードが観察される。

3・2 貯気室圧力比 $P_{0a}/P_{0b}=3$ の場合

(1) 各 Type 間の遷移の様子 本報の貯気室圧力比 $P_{0a}/P_{0b}=3$ の条件下では、ほとんどの $[1/Kn]_a$ で Type 1 と Type 2 間の遷移がみられた。その遷移の様子を図 3 の可視化写真に示す。

P_{0a}/P_{0b} が大きく Type 1 の状態 (図 3 (a)) から P_{0a}/P_{0b} を小さくすると、干渉領域がノズル中心軸方向に長くなり (図 3 (b))、さらに、 P_{0a}/P_{0b} を小さくすると、干渉領域にノズル A 側の噴流の第 2 のセルが形成され (図 3 (c))、ついにはノズル A 側の第 2 のセルが完全に形成され、Type 2 へと遷移する (図 3 (d))。逆に、Type 2 の状態から P_{0a}/P_{0b} を徐々に大きくすると、上記と逆の現象が起こり、Type 1 へと遷移する。また、図 3 の可視化写真からわかるように Type 1 と Type 2 間の遷移において、干渉領域の位置は、 P_{0a}/P_{0b} の増減に伴い徐々に変化する。

Type 3 は、 P_{0a}/P_{0b} の変化によって他の Type からの遷移は現れず、貯気室と膨張室の間に設けてあるバルブの開閉操作等の外乱によってのみ遷移が現れた。

Type 4 は、貯気室と膨張室の間に設けてあるバルブの開閉操作等の外乱を加えなくても P_{0a}/P_{0b} の変化により Type 1, Type 2, Type 3 のどの Type からも遷移することが観察された。Type 1, Type 2 から Type 4 への遷移は、遷移する圧力条件になると干渉領域がノズル A 側へ

瞬時に移動し、それと同時に干渉領域が変動し始める。Type 3 から Type 4 への遷移は、干渉領域の移動は起きないが、遷移する圧力条件になると、干渉領域においてノズル B の噴流がゆっくりと回転運動を始める。また、 $[1/Kn]_a=1900$ において、 $P_{aa}/P_b=144\sim 380$ で変化させると、図 4 に示すように流れ場構造が変化する。図 4 の上端は圧力比(P_{aa}/P_b)を示し、横線によって各 Type の存在する圧力比の範囲を表した。横線が縦の矢印となって終わる所は、流れ場構造が矢印先に示されている構造に遷移することを示している。ここで遷移は矢印の方向のみに起こり、逆向きの遷移は起こらない。 $P_{aa}/P_b=205\sim 380$ で Type 1 の流れ場が形成されている状態から P_{aa}/P_b を下げると、 $P_{aa}/P_b=205$ 付近で Type 4 に遷移する(図 4 中、矢印 A)。その後、 P_{aa}/P_b を下げて測定を行った範囲内では他の Type への遷移は現れない。しかし、 P_{aa}/P_b を上げると、 $P_{aa}/P_b=360$ 付近で Type 1 へ遷移する(図 4 中、矢印 E)。その後 P_{aa}/P_b の変化による流れ場構造の変化は上記と同様なことが繰り返される。

$P_{aa}/P_b=144\sim 165$ で、Type 2 の流れ場が形成されている状態から P_{aa}/P_b を上げると $P_{aa}/P_b=165$ 付近で Type 4 に遷移する(図 4 中、矢印 B)。Type 4 へ遷移した後の遷移の様子は、上記と同様である。図 4 において Type 3 への遷移を示す矢印はないが、Type 1 の状態で貯気室と膨張室の間に設けてあるバルブの開閉操作等による外乱によって Type 3 へ遷移する。その後、 P_{aa}/P_b を下れば $P_{aa}/P_b=220$ 付近で Type 4 へ遷移し(図 4 中、矢印 C)、 P_{aa}/P_b を上げれば $P_{aa}/P_b=375$ 付近で Type 1 へ遷移する(図 4 中、矢印 D)。また、図 4 中、遷移を表す矢印に付した英文字は次に示す図 5 (a)~(c)中の同一の英文字位置の圧力条件

Fig.3 Transition from Type1 to Type2
 ($P_{aa}/P_b=3$, $[1/Kn]_a=1680$)

Fig.4 An example of transitions of
 flow field structure of two opposed
 supersonic free jets

($P_{aa}/P_b=3$, $[1/Kn]_a=1900$)

に対応している。

(2)各Typeの存在領域 各Typeの存在する領域を図5 (a)～(c)に示す。横軸は圧力比(P_{sa}/P_b)を、縦軸はノズルA側の貯気室のクヌッセン数の逆数($[1/Kn]_a$)を示している。図中の点線は $P_b=1.415\text{ Torr}$ に対応し、膨張室圧力の測定に用いたダイヤフラム式真空計の低圧側の測定限界である。流れ場構造のTypeが示してあるハッチングの領域から P_{sa}/P_b を変化させ実線部分を超えて別の領域へ出ると、その領域に示したTypeに遷移する。

Type 1, Type 2 間で遷移する時は干渉領域の位置が徐々に変化し、また第2のセルの垂直衝撃波は弱く、存在の有無がはっきりしない(図3参照)ため、はっきりとした区別が困難になった。よって、Type 1, Type 2 を1つの領域として示した。図のハッチングされた領域内で、Type 1 は P_{sa}/P_b と $[1/Kn]_a$ が共に大きい範囲で存在し、Type 2 は P_{sa}/P_b と $[1/Kn]_a$ が共に小さい範囲で存在している。Type 3 は、 $P_{sa}/P_b=3$ の場合は $[1/Kn]_a$ が小さい範囲で存在領域が狭い。また、存在領域が $[1/Kn]_a=1300$ 付近でくびれているが、このくびれの上でType 3 とType 4 の間の遷移の条件が異なる。 $[1/Kn]_a > 1300$ では、Type 3 からType 4 へ遷移(遷移はハッチングしてある領域をでるときに起こる)する圧力条件とType 4 からType 3 へ遷移する圧力条件(図4 (c)参照)が大きく異なり、Type 3 とType 4 の重複する存在範囲が広い。一方、 $[1/Kn]_a < 1300$ では、Type 3 とType 4 間の遷移が双方向ほぼ同じ

(a) Type 1 and Type 2 ; $P_{sa}/P_b=3$

(b) Type 3 ; $P_{sa}/P_b=3$

(c) Type 4 ; $P_{sa}/P_b=3$

(d) Region which each type of the flow field exists ; $P_{sa}/P_b=5$

Fig.5 The conditions of pressure for each type of the flow field

圧力条件で起こり、両Typeの重複する存在範囲がほとんどない。また、Type3が存在している状態で P_{aa}/P_b を小さくすると時間的に変動する流れ場のType4へ遷移し、 P_{aa}/P_b を大きくすると時間的に安定した流れ場のType1またはType2へと遷移する。

図5(c)はType4の存在領域を示している。Type4が存在している状態で P_{aa}/P_b を小さくすると、Type2へと遷移する。逆に P_{aa}/P_b を大きくすると、 $[1/Kn]_a$ が小さい範囲では干渉領域の変動が止まりType3へと遷移するが、 $[1/Kn]_a$ が大きい範囲ではType3の存在しうる範囲内でもType1へ遷移する。

3・3 貯気室圧力比 $P_{aa}/P_{bb}=3$ より大きい場合。

貯気室圧力比 $P_{aa}/P_{bb}=3$ より大きい場合の一例として、 $P_{aa}/P_{bb}=5$ の場合の各Typeが現れる領域を図5(d)に示す。貯気室圧力比 $P_{aa}/P_{bb}=5$ の特徴として、測定を行った P_{aa}/P_b の範囲でType1とType2が共に共存しない $[1/Kn]_a$ ($[1/Kn]_a=2000$ 付近)が存在し、この $[1/Kn]_a$ の範囲は、貯気室圧力比(P_{aa}/P_{bb})が大きくなると広がる傾向にある。また、Type3とType4の遷移の境界があいまいなため、Type3とType4の流れ場を区別しない方が適当であると思われる。

4. 結論

- (1) 同じ圧力条件にいくつかの流れ場のTypeが存在し、各構造間の遷移は、双方向同じ圧力条件で起こるとは限らない。
- (2) 貯気室圧力比(P_{aa}/P_{bb})によらず、両噴流の第一のセル同士で干渉する構造(Type1)は、高い方の貯気室圧力比の膨張室圧力比に対する比(P_{aa}/P_b)と圧力が高い方の貯気室のクヌッセン数の逆数($[1/Kn]_a$)が共に大きい範囲で現れ、高圧側のノズルの噴流の第一のセルの下流に形成されたセルと、低圧側のノズルの噴流の第一のセルが干渉する構造(Type2)は、 P_{aa}/P_b と $[1/Kn]_a$ が共に小さい範囲で現れる。
- (3) 貯気室圧力比(P_{aa}/P_{bb})が比較的に小さい場合は、Type1とType2が支配的な流れ場構造となるが、貯気室圧力比(P_{aa}/P_{bb})が大きくなると、高圧側のノズルの噴流の第一のセルと、低圧側のノズルの噴流の第一のセルの下流に形成されたセルが干渉する構造(Type3)とType4が支配的な流れ場構造となる。

5. 参考文献

- (1) 新美智秀他；対向する超音速自由噴流の可視化と構造解析
可視化情報 Vol.10 Suppl. No.2 (1990) P29
- (2) 新美智秀他；L I F法による対向する超音速自由噴流の構造解析
日本機械学会論文集(B編) 57-539 (1991) P2233