

# 垂直平板に衝突する超音速不足膨張噴流の自励振動に及ぼす平板位置と圧力比の影響

安信 強, 乙部由美子, 島津公紀, 樫村秀男

## Effect of Plate Position and Pressure Ratio for Self-Induced Flow Oscillation of Underexpanded Supersonic Jet Impinging on Perpendicular Plate

Tsuyoshi YASUNOBU, Yumiko OTOBE, Masaki SHIMAZU and Hideo KASHIMURA

### Abstract

When the underexpanded supersonic jet impinges on the obstacle, the self-induced flow oscillation occurs at the specific condition. This oscillation is related with the noise problems of aeronautical and other industrial engineering so that the characteristic and the mechanism of self-induced flow oscillation have to be cleared to control the various noise problems. But, it seems that the characteristics of the oscillated flowfield and the mechanism of oscillation have to be more cleared to control the oscillation. This paper aims to clear the characteristic of the wave structure and the effect of the plate position and the pressure ratio for the self-induced flow oscillation of an underexpanded supersonic jet impinging on the perpendicular plate by the experiment. From the results, it is cleared that the occurring domain of the self-induced flow oscillation strongly depends on the plate position and the pressure ratio.

**Keywords** : Flow Visualization, Schlieren Method, Underexpanded Jet, Impinging Jet, Mach disk

### 1. はじめに

超音速噴流と物体との干渉現象は、工学的な興味だけではなく、例えばロケットの発射台や多段式ロケットの分離、熱強化ガラスの製作、スートブローなどの工業的な問題と関わりがあることから、従来から多くの研究がなされている<sup>(1)~(3)</sup>。さらに、噴流を形成させる貯気圧と背圧との圧力比や、物体の形状、設置位置などが特定の条件下にあるとき、噴流中の衝撃波が流れ方向に自励振動する場合がある<sup>(4)</sup>。例えば、高压配管中で自励振動が起こると、バルブの振動や騒音の発生原因となる。そのため、これまでに自励振動の発生機構<sup>(5)</sup>や抑制法<sup>(6)</sup>に関していくつかの報告がなされているが、貯気圧と背圧との圧力比や物体の形状、設置位置などの影響を考慮した、系統的な調査が必要と考えられる。

この点に関して、著書らは従来からノズル出口と同等径の円柱体に超音速噴流が干渉するときの自励振動現象について、貯気圧と背圧との圧力比や円柱体の設置位置を変化させて調査を行っている。これらの結果から、自励振動が発生する条件や自励振動時の衝撃波の振動範囲<sup>(7)</sup>、および自励振動の周波数特性<sup>(8)</sup>が明らかとなった。さらに、自励振動の抑制法として半円形プレートに着目し、半円形プレートによる振動抑制効果<sup>(9)</sup>について実験的に調査し、その効果を明らかにした。

しかし、超音速噴流が垂直平板に干渉する場合は、平板によって流れが曲げられるため、円柱体の場合とは流れに相違が生じる。このため、形成される波動にも相違が現れ、特に平板近傍には複雑な圧力波が形成される<sup>(1)</sup>。したがって、垂直平板との干渉による自励振動の特性は円柱体との干渉による自励振動の特性と異なると考えられるが、垂直平板との干渉による自励振動現象につ

いては貯気圧と背圧との圧力比や平板の設置位置などの影響を考慮した系統的な調査が不十分で、さらなる調査が必要と考えられる。

そこで本研究では、超音速不足膨張噴流が垂直平板に干渉するときの自励振動現象に対して、流れ場の圧力比と平板の設置位置が及ぼす影響について可視化実験により調査し、円柱体との干渉の場合の結果と比較することを目的とする。

### 2. 実験装置および実験方法

超音速不足膨張噴流と垂直平板との干渉により形成される流れのモデルの一例と使用記号をFig.1に示す。この図は文献(1)での流れのスケッチを元に作成しており、図中の衝撃波の名称も文献(1)に基づいている。図より、流れ場内にはマッハディスクやStandoff shockが形成され、これらの衝撃波によって流れの速度が減速される。また、図には示していないが、流れが平板で曲げられる際に、条件によってはStandoff shockの下流側にSub-tail shockが形成される場合もあり、複雑な波動構造となる。さらに、形成される波動は、貯気圧 $p_0$ と背圧 $p_b$ との圧力比 $\phi(=p_0/p_b)$ やノズル出口から平板までの距離 $x_p$ によって変化する。本研究では、図に示すようにノズル出口直径を $D$ 、ノズル出口からマッハディスクまでの距離を $x_m$ 、ノズル出口からStandoff shockまでの距離を $x_s$ とそれぞれ定義する。

本研究で使用した実験装置の系統図をFig.2に示す。本実験装置はコンプレッサー、測定部、真空タンク、真空ポンプおよび可視化装置より構成され、測定部に出口直径 $D=6$  [mm]の先細ノズルと垂直平板を取り付けた。作動気体は空気であり、流れ場の圧力比 $\phi$ を変化させた。また、垂直平板に加え、比較のために無次元直径が $d_s/D=1.8$ の

円柱体についても調査し、これらの設置位置を $2 < x_p/D < 4$ の範囲で変化させて実験を行った。

一方、流れの可視化にはシステムシュリーレン装置 (カトウ光研製, 100L) を使用し、可視化画像を高速カメラ (Photron製, FASTCAM SA 1.1) で撮影してコンピュータに記録した。本実験で使用した高速カメラは最速675,000fpsでの撮影が可能であり、自励振動する衝撃波を静止画で撮影することが可能である。

### 3. 実験結果と考察

実験で得られた可視化画像の一例を、Fig.3とFig.4に示す。いずれの図も自励振動時の瞬間画像である。

Fig.3は垂直平板との干渉による自励振動時の可視化画像を示しており、圧力比 $\phi$ を変化させた場合の結果を示す。図(a)と図(b)を比較すると、圧力比 $\phi$ の増加によりマッハディスクの形成位置と直径が変化し、さ

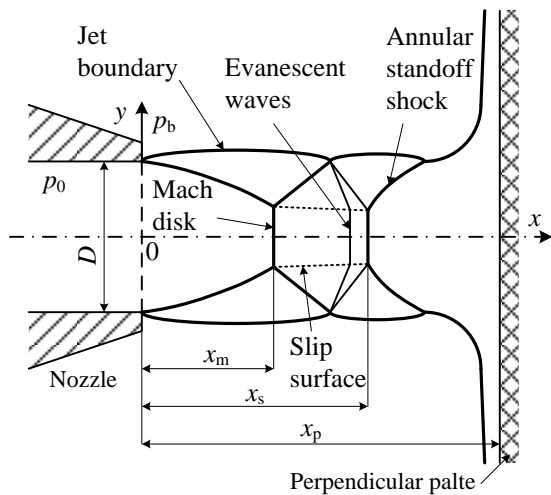


Fig. 1 Schematics of jet structure of underexpanded supersonic jet impinging with perpendicular plate

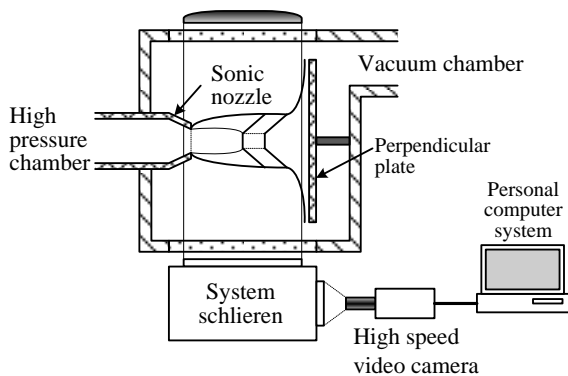
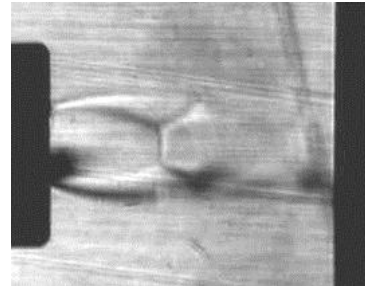
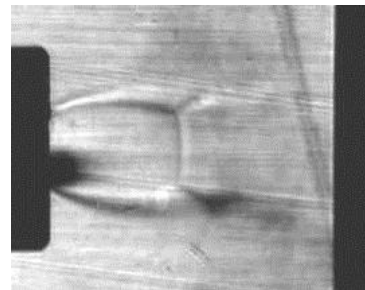


Fig.2 Experimental apparatus

らにマッハディスクの形状がわずかに弓状に変形していることがわかる。

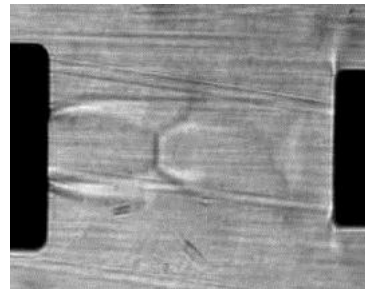


(a)  $\phi=5$

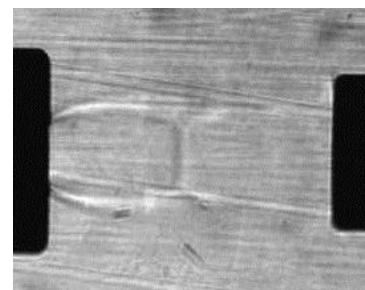


(b)  $\phi=10$

Fig.3 Typical schlieren pictures of perpendicular plate ( $x_p/D=4$ )



(a)  $\phi=5$



(b)  $\phi=10$

Fig.4 Typical schlieren pictures of cylindrical body ( $x_p/D=4$ )

Fig.4は円柱体との干渉による自励振動時の可視化画像であり、比較のために示している。Fig.3と同様にこの条件ではノズル出口側に形成されるマッハディスクはほとんど振動せず、マッハディスクの下流側、すなわち円柱体前面に形成されるStandoff shockが流れ方向に自励振動する。

ノズル出口からマッハディスクまでの無次元距離  $x_m/D$  と圧力比  $\phi$  との関係をFig.5に示す。本研究では、垂直平板との干渉により形成される波動の基本的な特性を調べるため、まず圧力比  $\phi$  を広い範囲で変化させて実験を行い、マッハディスクの形成位置について考察した。Fig.5はその結果を示しており、図中のプロット点がマッハディスクの形成位置を表す。また、図中の実線は垂直平板のない場合、すなわち自由噴流中のマッハディスクの形成位置に関するAddyの実験式<sup>(10)</sup>による結果で、次式で示される。

$$x_m/D = \sqrt{0.65\phi} \quad (1)$$

なお、式(1)は、ノズル出口マッハ数が  $M_e=1$  の場合に成立する。

図より、圧力比  $\phi$  の増加に対して、圧力比  $\phi$  が低い領域ではマッハディスクまでの無次元距離  $x_m/D$  も増加するが、圧力比  $\phi$  が高くなると  $x_m/D$  の増加量は次第に減少し、一定値に漸近することがわかる。また、式(1)との比較では、圧力比  $\phi$  が低い一部の領域で本実験結果と式(1)による結果は一致、すなわち自由噴流中の形成位置とほぼ一致する。さらに、圧力比  $\phi$  が増加すると自由噴流中のマッハディスクの形成位置と一致せず、マッハディスクはノズル出口側に形成される。

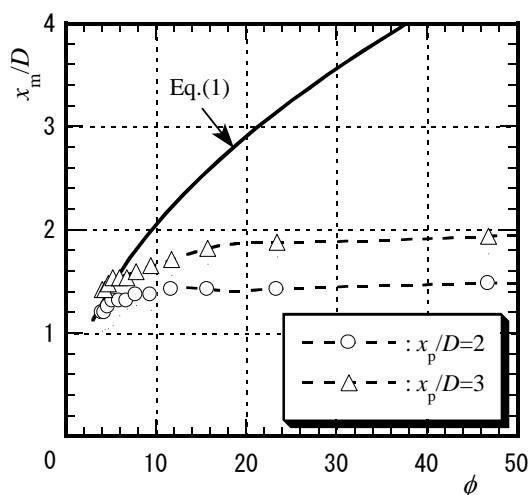
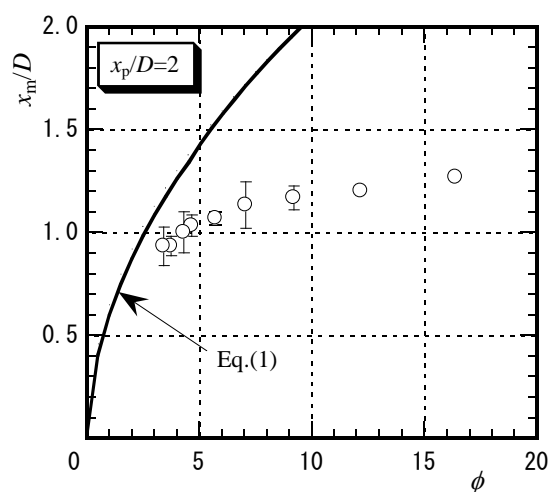


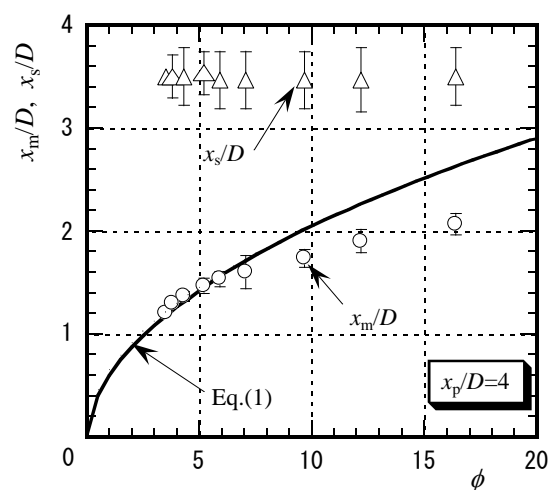
Fig.5 Relation between position of Mach disk  $x_m/D$  and pressure ratio  $\phi$  for perpendicular plate

これは、垂直平板の存在によってマッハディスクが下流側に移動できないためである。本研究では、Fig.5の結果に基づいて、圧力比  $\phi$  をマッハディスクまでの無次元距離  $x_m/D$  が概ね一定となる  $3 < \phi < 18$  の範囲で変化させて調査することにする。

ノズル出口からマッハディスクおよびStandoff shockまでの無次元距離  $x_m/D$ ,  $x_s/D$  と圧力比  $\phi$  との関係をFig.6に示す。この図は平板の設置位置が  $x_p/D=2$  と4の場合の結果を示しており、いずれの図もプロット点がマッハディスクおよびStandoff shockの形成位置を表す。また、エラーバーは自励振動時のマッハディスクもし



(a)  $x_p/D=2$



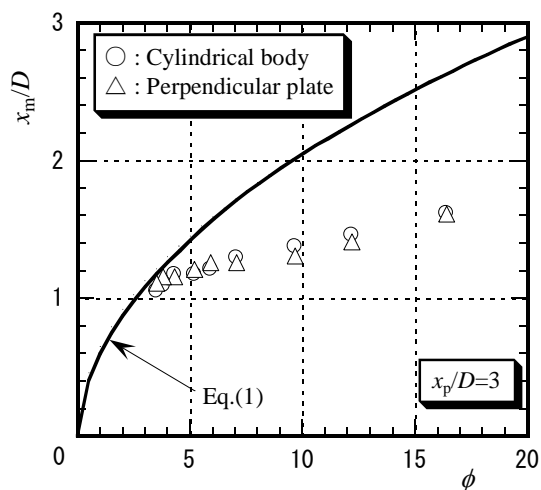
(b)  $x_p/D=4$

Fig.6 Relation between position of shock wave  $x/D$  and pressure ratio  $\phi$  for perpendicular plate

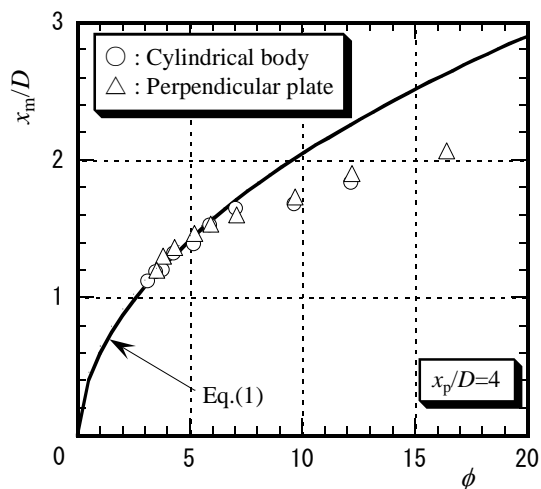
くはStandoff shockの位置範囲を示し、このときのプロット点は振動時の中心位置を表わす。

図(a)は平板の無次元設置位置が $x_p/D=2$ の場合の結果を示しており、この条件ではStandoff shockは形成されず、マッハディスクのみが形成される。また、実験結果に多少のばらつきが観察されるが、マッハディスクの自励振動は圧力比が低い領域、すなわち、圧力比 $\phi$ の増加に対してマッハディスクの無次元距離 $x_m/D$ も増加する領域で発生することがわかる。

図(b)は平板の無次元設置位置が $x_p/D=4$ の場合の結果を示しており、図(a)と比べてこの条件ではマッハディスクとStandoff shockの双方が形成される。また、圧



(a)  $x_p/D=3$



(b)  $x_p/D=4$

Fig.7 Influence of obstacle size for position of Mach disk

力比 $\phi$ が低い場合、マッハディスクの形成位置はAddyの実験式による結果、すなわち自由噴流中のマッハディスクの形成位置とよく一致する。さらに、圧力比 $\phi$ が増加するとマッハディスクまでの無次元距離 $x_m/D$ も増加するが、増加量は次第に減少し、Addyの実験式による結果と差が生じる。これは図(a)と同様に、圧力比 $\phi$ の増加によって垂直平板がマッハディスクの形成位置に影響を及ぼすためである。さらに、振動範囲は狭いが、圧力比 $\phi$ が増加するとマッハディスクの自励振動が観察され、本実験の圧力比範囲では $\phi>5$ の領域で自励振動が発生する。

一方、Standoff shockの形成位置は圧力比 $\phi$ が増加してもそれほど変化せず、ほぼ一定となる傾向を示す。また、圧力比 $\phi$ が低い場合を除いてStandoff shockの自励振動が観察され、マッハディスクに比べてStandoff shockの自励振動が発生する圧力比の範囲と自励振動時の位置範囲は広い。よって、本実験条件下では、マッハディスクよりもStandoff shockの自励振動が顕著に表れる。さらに、圧力比 $\phi>5$ の範囲ではマッハディスクとStandoff shockの双方が自励振動しており、物体の設置位置が一定でも圧力比 $\phi$ によって振動する衝撃波が異なる。この現象は円柱体との干渉による自励振動でも観察され、無次元設置位置 $x_p/D$ が比較的大きい、すなわちノズル出口から比較的に離れて円柱体が設置されている場合に発生する。

マッハディスクの自励振動に及ぼす物体の影響をFig.7に示す。

図(a)は、平板の無次元設置位置が $x_p/D=3$ の場合の結果を示している。図より、圧力比 $\phi$ が低い領域において実線で示す自由噴流中の形成位置に近く、圧力比 $\phi$ の増加によって自由噴流中の形成位置と異なり、両者の差は増加することがわかる。また、マッハディスクまでの無次元距離に対する円柱体と垂直平板の顕著な差異は観察されず、圧力比 $\phi$ の増加に対して同一の傾向を示す。

一方、図(b)の $x_p/D=4$ の場合の結果では、圧力比 $\phi$ が比較的高い状態でもマッハディスクはAddyの実験式による結果、すなわち自由噴流中のマッハディスクの形成位置とよく一致する。また、圧力比 $\phi$ が増加すると、次第にAddyの実験式による結果との差が観察される。これは、平板の設置位置がノズル出口から離れており、圧力比が低い領域で物体の及ぼす影響が弱いためである。さらに、垂直平板と円柱体との相違については、図(a)と同様に、それほど顕著な相違は観察されない。

以上のことから、垂直平板との干渉による自励振動と円柱体との干渉による自励振動を比較すると、自励振動が発生する圧力比の領域と振動する衝撃波、および衝撃波の振動範囲に差が現れる。しかし、マッハディスクの形成位置については、それほど顕著な差異を

示さない傾向を示す。

#### 4. 結 論

本研究では、超音速不足膨張噴流が垂直平板に干渉するときの自励振動を実験的に調査し、円柱体の場合の結果と比較した。また、垂直平板の設置位置と流れ場の圧力比が自励振動に及ぼす影響について考察した。得られた結果を以下に要約する。

- (1) 垂直平板の無次元設置位置が変化すると、流れ場内に形成される衝撃波が異なる。また、流れ場内にマッハディスクと Standoff shock が形成される場合では、流れ場の圧力比  $\phi$  によって振動する衝撃波が変化する。
- (2) 自励振動が発生する圧力比の範囲はマッハディスクより Standoff shock の方が広く、さらに自励振動時の位置範囲もマッハディスクより Standoff shock の方が広い。
- (3) マッハディスクの形成位置は垂直平板の無次元設置位置  $x_p/D$  と圧力比  $\phi$  に依存する。特に垂直平板の無次元設置位置  $x_p/D$  が短く、圧力比  $\phi$  が高い場合にはマッハディスクの形成位置は一定値に漸近する傾向を示す。これに対して、Standoff shock は垂直平板の無次元設置位置  $x_p/D$  が比較的長い場合に形成され、圧力比  $\phi$  が変化しても Standoff shock の形成位置はそれほど変化しない。
- (4) 垂直平板との干渉の際のマッハディスクの形成位置は、円柱体との干渉の際の結果とそれほど大きな差異はないが、自励振動が発生する条件と、マッハディスクの振動範囲に相違が観察される。

#### 参考文献

- (1) Lamont P. J. and Hunt B. L., The impingement of underexpanded, axisymmetric jets on perpendicular and inclined flat plates, J. of Fluid Mech., Vol.100, Part 3, (1980), pp. 471-511.
- (2) Aratani S., Ojima H. and Takayama K., The observation of supersonic jets from nozzles during the glass tempering process, Proc. of Second Symposium on High Speed Photography and Photonics, (1995), pp.11-20.
- (3) Powell A., The sound-producing oscillations of round underexpanded jets impinging on normal plates, J. of Acoustic. Society of America, Vol.83, No.2, (1988), pp.515-533.
- (4) Jungowski, W. M., Some Self Induced Supersonic Flow Oscillations, Progress in Aerospace Sciences, Vol.18, (1978), pp.151-175.
- (5) Nakano M., Ota E. and Tajima K., Noise and vibration

related to the patterns of supersonic annular flow in a pressure reducing gas valve, J. of Fluids Engineering, Vol.110, (1988), pp.55-61.

- (6) Ishii, R., Fujimoto, H., Kusaka, E., Umeda, Y. and Hatta, N., Discrete Tones Generated by Supersonic Jets Impinging on a Truncated Cylinder, Proc. 8th International Congress on Sound and Vibration, (2001), pp.555-562.
- (7) Yasunobu T., Matsuoka T., Kashimura H. et al., Characteristics of Pressure Fluctuation Caused by Self-Induced Flow Oscillation of Under-expanded Impinging Jet, Theoretical and Mechanics Japan, Vol.52, (2003), pp.103-108.
- (8) Yasunobu T., Otake Y. and Kashimura H., Effect of Pressure Ratio for Self-Induced Flow Oscillation of Underexpanded Supersonic Jet Impinging Cylindrical Body, Theoretical and Mechanics Japan, Vol.58, (2009), pp.197-203.
- (9) Yasunobu T., Otake Y. and Kashimura H., Characteristics of Oscillation Frequency Caused by Supersonic Impinging Jet, Jets, Wakes and Separated Flows, (2005), pp.123-128.
- (10) Addy A. L., Effects of Axisymmetric Sonic Nozzle Geometry on Mach Disk Characteristics, AIAA J., Vol.19, No.1, (1981), pp.121-122.

(2010年10月15日 受理)