

# 超音速不足膨張矩形噴流の特性に及ぼすノズルのアスペクト比の影響

安信 強, 蔣 欣, 島津公紀

Effect by Aspect Ratio of Nozzle on Characteristic of Underexpanded Rectangular Supersonic Jet

Tsuyoshi YASUNOBU, Xin JIANG and Masaki SHIMAZU

## Abstract

The interaction between the supersonic jet and an obstacle is one of fundamental problems of the compressible fluid dynamics and causes the various problems of the aeronautical and other engineering, such as the design of a rocket launcher system. It seems that the characteristic of the interaction between the rectangular jet and an obstacle is necessary to clarify to control the interacting jet, but it is not conducted many investigations into the characteristic of a rectangular jet. This paper aims to clarify the characteristic of the interaction between the rectangular jet and an obstacle and effect of the nozzle aspect ratio by the experiment and the numerical analysis.

**Keywords** : Underexpanded Jet, Mach Disk, Impinging Jet, Flow Oscillation, Numerical Analysis.

## 1. はじめに

超音速噴流は、適正膨張を除いて噴流中に衝撃波などの圧力波を含んだ複雑な波動構造を有し、さらに噴流が物体と干渉する場合は、物体の影響を受けて噴流構造がより複雑となる。噴流と物体との干渉現象は、例えばロケットの発射台や多段式ロケットの分離、スートブローや溶射、ガラスの急速冷却など工業的にも重要であることから、従来から数多くの研究が行われているが<sup>(1)-(7)</sup>、条件的には不足膨張域が多く、さらに円形ノズルを用いた軸対称の噴流が多い。しかし、出口マッハ数が $M_e > 1$ となる超音速域では、円形のラバルノズルでは断面構造が複雑となり、製作も手間がかかることから、超音速風洞では二次元ノズルを用いた矩形断面の流路も多い。したがって、矩形のノズルで超音速噴流を形成させた場合、円形ノズルを用いた軸対称噴流との相違など、工学的な興味があるが、三次元の複雑な流れ場が形成され、さらに矩形ノズル出口の高さと幅の比であるアスペクト比の影響を強く受けることから、従来は調査されていなかった。しかし、数値シミュレーションの進展によって三次元の流れ場の計算が比較的容易に計算可能となり、矩形噴流について数値シミュレーションを中心に研究がかなり行われているが、円形噴流に比べて、まだ未解明なことも多い。特に矩形噴流は、ノズルコーナーの影響を受けて噴流断面の圧力や温度などの分布は円形、すなわち軸対称ではなく、十文字状になり、さらに条件によっては十文字の垂直および水平方向の長さが増加する **Axis-switching** 現象が起こり<sup>(8)</sup>、これに矩形ノズルのアスペクト比の影響が加わることから、ノズル出口形状の影響がより顕著に現れ、現象の解析を困難にしている。

本研究では、矩形ノズルで形成された超音速噴流と物体との干渉現象の特性の調査を主目的とし、本報では、

矩形ノズルのアスペクト比の影響を主眼に実験を主体に数値解析を併用して調査し、考察することを目的とする。

## 2. 解析方法

### 2.1 実験方法

矩形ノズルより形成される超音速衝突噴流の模式図を **Fig.1** に示す。円形噴流の場合と同様に流れ場内には衝撃波を伴った複雑な波動が形成され、特定の条件下で噴流中の垂直衝撃波などが流れ方向に自励振動することが知られている。本研究では、物体の位置などの記号を **Fig.1** のように定義する。

本実験で使用した実験装置を **Fig.2** に示す。実験では、高さ $h=6.1$  [mm]、幅 $b=4.1$  [mm]、アスペクト比 $A_s=0.5$ 、 $h=6.1$  [mm]、幅 $b=4.1$  [mm]、アスペクト比 $A_s=0.7$ 、および $h=b=4.1$  [mm]、アスペクト比 $A_s=1$ の3種類の矩形ノズルを用い、測定部にこのノズルと直径 $d_c=7$  [mm]の円柱体を $x_c=20, 30$  [mm]の位置に設置し、超音速噴流を干渉させる。本研究では、アスペクト比の影響を調査することから、3種類のノズルの出口面積が同一になるように、ノズルを製作した。また、作動気体には空気を用い、貯気圧 $p_0$ と背圧 $p_b$ との圧力比 $\phi (=p_0/p_b)$ を $1.6 < \phi < 19.2$ の範囲内で変化させて超音速噴流を発生させ、円柱体と干渉した際に形成される流れ場をシステムシュリーレン装置により可視化し、画像を高速カメラで撮影して解析した。なお、矩形ノズルでは三次元構造の流れ場が形成されるため、垂直方向と水平方向の二方向から可視化し、解析した。

### 2.2 数値解析方法

矩形ノズルで形成される超音速噴流は、複雑な三次元の波動構造を有することから、一方向からの流れの可視化実験では、噴流構造の解析は困難である。そこで本研

究では、実験と同一の圧力比で矩形ノズルと円柱体との干渉により形成される流れ場について、数値解析を行った。計算モデルのノズル付近の拡大図をFig.3に示す。数値解析には ANSYS Fluent-15.0 を使用し、乱流モデルには SST  $k-\varepsilon$  モデルを用いて、圧縮性の非定常計算を行った。ノズル形状は実験と同一であり、さらに圧力比も実験と同一の $\phi=8$ , 14と変化させ、理想気体モデルを用いて使用する気体は空気とし、初期温度は300 [K]とした。

### 3. 解析結果および考察

矩形噴流と円柱体との干渉時の数値解析結果をFig.4とFig.5に示す。Fig.4は流れに直交する方向から見た等密度線図で、図(a)は噴流の上下方向から、図(b)は水平方向から見た等密度線図で、図(b)は可視化実験と同様な方向となる。図より赤色の線で示す衝撃波による急激な密度変化が観察され、さらに円柱体の前面に垂直衝撃波が形成されており、円形ノズルの場合のたる型衝撃波(Barrel shock)およびMach disk(円形の垂直衝撃波)と類似の構造であるが、断面構造は不明である。また、ノ

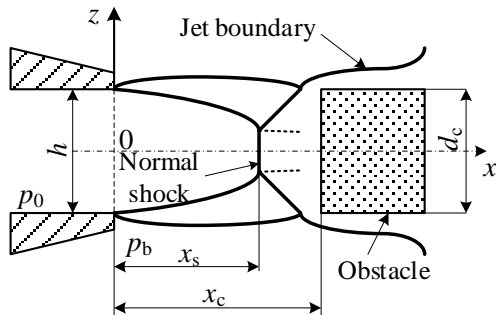


Fig.1 Flow model and symbols used in this study

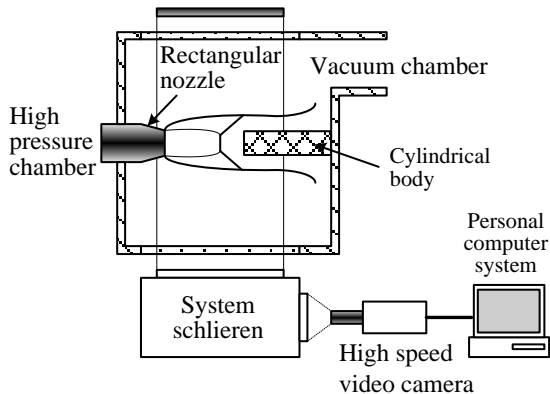


Fig.2 Experimental apparatus used this study

ズルや円柱体近傍の等密度線の形状から、ややメッシュサイズが粗いと考えられ、今後の検討事項である。噴流の断面方向の等密度線図をFig.5に示す。この場合の流れ場の圧力比は $\phi=8$ 、円柱体の無次元設置値は $x_c/d_e=4$ である。また、図(a)はノズル出口直後、図(b)はノズル出口から下流に3[mm]の位置、図(c)は同様に6[mm]、図(d)は9[mm]、図(e)は12[mm]での結果を示す。図より、矩形噴流の噴流断面は上流から下流にかけて矩形から楕円、ひし形、十文字型と変化しており、噴流断面の水平方向と垂直方向の噴流の大きさがノズル出口からの距離によって変化するAxis-switching現象が発生していることがわかる。円形噴流の場合、噴流断面の大きさは異なるが円形、すなわち軸対称となるが、矩形噴流ではノズル出口からの距離によって噴流断面の形状は変化しており、ノズル出口からどの距離で物体と干渉するかも重要な考察すべき要素となる。さらに赤色の線で示す急激な密度変化が観察されるが、これは衝撃波による急激な密度変化であり、衝撃波の断面構造は円形のような軸対象ではなく、ひし型に近い。そのため、Fig.4に示した赤色の線で示す衝撃波による急激な密度変化は、ひし型断面の衝撃波の頂点部分の密度変化を表すと考えられる。

矩形噴流と円柱体との干渉時のシュリーレン写真の一例をFig.6に示す。この場合の流れ場の圧力比は $\phi=15$ で、図(a)はアスペクト比が $A_s=0.5$ 、図(b)はアスペクト比が $A_s=1$ 、図(c)は円形噴流の場合の可視化結果で、いずれも水平方向から可視化した場合の結果を示している。いずれの可視化結果も円形噴流と同様にMach diskやBarrel shockと同等の衝撃波を観察でき、円形噴流と同様の軸対称の構造のように観察されるが、ノズルコーナーから中心軸に向かう斜め衝撃波のような比較的強い圧力波も観察でき、軸対称のように単純な構造ではない。さらに、Fig.6は瞬間的な静止画であるため、確定は困難であるが、いずれの条件においても動画を観察すると円柱体前面に形成される衝撃波の流れ方向の振動を観察でき、

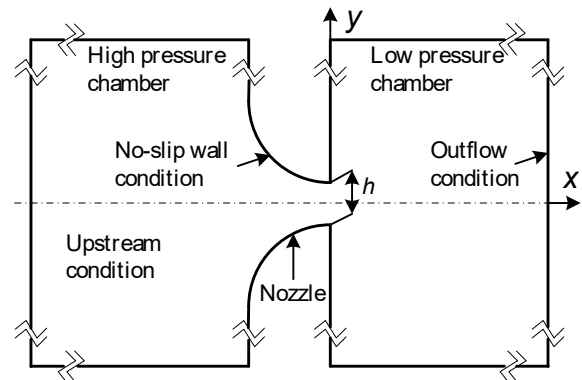


Fig.3 Calculation domain

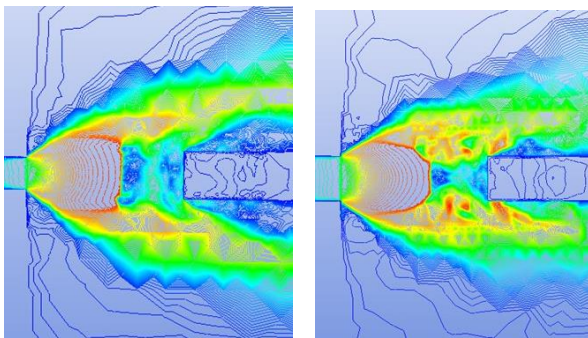
矩形噴流の自励振動現象の発生を確認できた。

円柱体に干渉する場合の矩形ノズルで形成される衝撃波の形成位置 $x_s/d_e$ と流れ場の圧力比 $\phi$ との関係をFig.7に示す。また、図中の実線は円形の自由噴流中の衝撃波(Mach disk)の形成位置を示す以下のAddyの式<sup>(9)</sup>による結果を示し、円形噴流との比較のため、Fig.6のみ、衝撃波の形成位置は等価直径を用いて無次元化している。

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

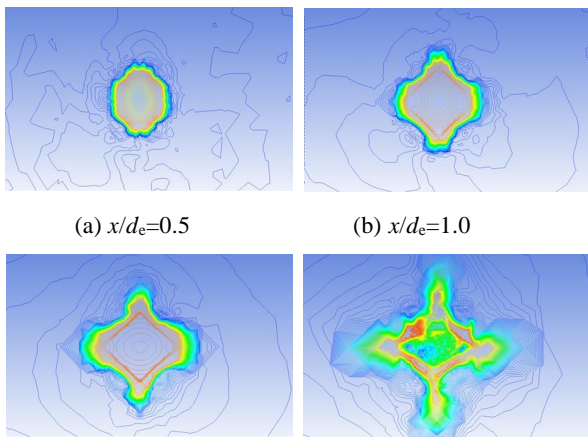
ここで、 $x_m$ は自由噴流中の衝撃波(Mach disk)の形成位置、 $d_e$ は円形ノズルの出口直径を表す。

図より、圧力比 $\phi$ が上昇するとともに、衝撃波の無次元形成位置 $x_s/d_e$ も増加、すなわち下流側に移動することがわかる。また、衝撃波の無次元形成位置 $x_s/d_e$ も円形の自由噴流中の衝撃波、すなわちMach diskの無次元形成位置とほぼ一致しており、物体(円柱体)が比較的下流に設置される場合、等価直径で無次元化した場合の矩形噴流中



(a) x-z plane (b) y-z plane

Fig.4 Typical contour maps obtained by numerical analysis ( $\phi=8$ )



(a)  $x/d_e=0.5$  (b)  $x/d_e=1.0$

(c)  $x/d_e=1.5$  (d)  $x/d_e=2.5$

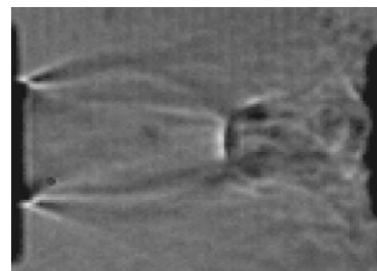
Fig.5 Typical contour maps at cross section obtained by numerical analysis ( $\phi=8$ )

Machdisk の無次元形成位置と概ね一致する傾向にある。の衝撃波(垂直衝撃波)の形成位置は円形噴流のさらに、矩形噴流中の垂直衝撃波の自励振動範囲については圧力比 $\phi$ が増加すると増加しており、圧力比 $\phi$ が自励振動に強く影響することがわかる。

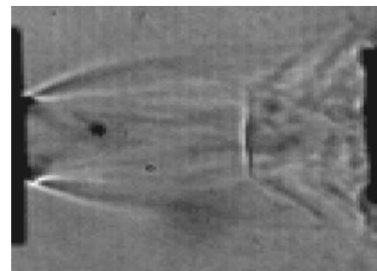
#### 4. 結論

本研究では、矩形ノズルで形成される不足膨張噴流と円柱体との干渉現象および自由噴流について実験および数値解析により調査した。得られた結果を以下に要約する。

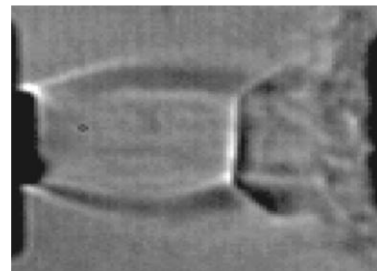
- (1) 矩形噴流の数値解析結果より、アスペクト比 $A_s$ と流れ場の圧力比 $\phi$ は矩形噴流の断面形状に影響を及ぼし、さらに圧力比 $\phi$ が低い場合には、噴流断面の水平方向と垂直方向の噴流の大きさがノズル出口からの距離によって変化する Axis-switching 現象の発生が確認できた。また、矩形ノズルで形成される噴流中の衝撃波は、ひし型の断面形状を有する。



(a)  $\phi=15$  ( $A_s=0.5$ )



(b)  $\phi=15$  ( $A_s=1$ )



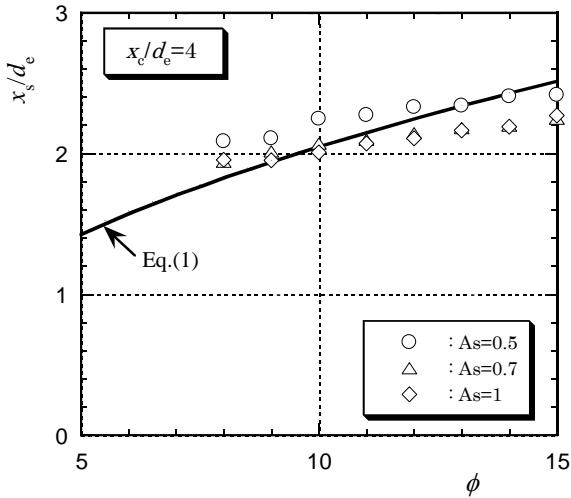
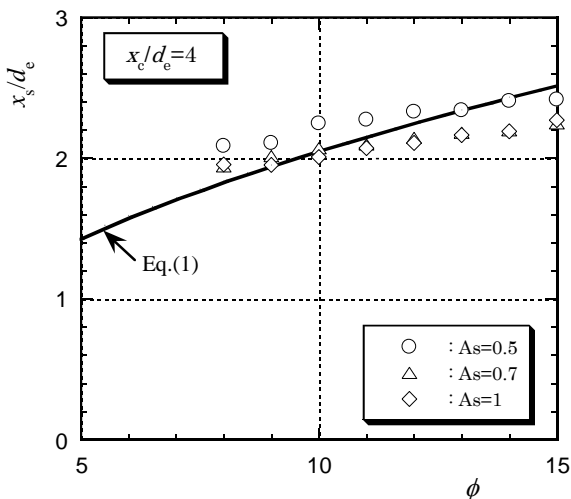
(c)  $\phi=15$  (Circular)

Fig.6 Typical schlieren photograph ( $x/d_e=4$ )

## 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) 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.
- (5) Jungowski, W. M., Some Self Induced Supersonic Flow Oscillations, Progress in Aerospace Sciences, Vol.18, (1978), pp.151-175.
- (6) 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.
- (7) Yasunobu, T., Otobe, Y., Kashimura, H. and Setoguchi, T., Characteristics of Oscillation Frequency caused by Supersonic Impinging Jet, Proc. of ICJWSF-2005, (2005), pp.123-128.
- (8) Huanhao Zhang et.al, Characteristic behavior of shock pattern and primary vortex loop of a supersonic square jet, Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol.115, (2017), pp.347-363.
- (9) Addy A. L., Effects of Axisymmetric Sonic Nozzle Geometry on Mach Disk Characteristics, AIAA J., Vol.19, No.1, (1981), pp.121-1220.

(2020年11月 4日 受理)

(a)  $x_c/d_e=4$ (b)  $x_c/d_e=5$ 

**Fig.6** Relation between non-dimensional position of shock wave  $x_s/d_e$  and pressure ratio  $\phi$

- (2) 矩形噴流中に形成される垂直衝撃波の形成位置 $x_s$ はアスペクト比 $A_s$ と流れ場の圧力比 $\phi$ に依存し、流れ場の圧力比 $\phi$ の増加により下流側に移動する。また、等価直径 $d_e$ で無次元化した場合、矩形噴流中の垂直衝撃波の無次元形成位置  $x_s/d_e$  は、円形噴流のMach diskの無次元形成位置と概ね一致する。
- (3) 矩形噴流が円柱体に干渉する場合も噴流中の垂直衝撃波の自励振動が発生し、噴流中の垂直衝撃波が流れ方向に振動する。