

超音速不足膨張矩形噴流の特性に関する研究

安信 強, 蔣 欣, 島津公紀

Investigation for 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 by the experiment and the numerical analysis.

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

1. はじめに

超音速噴流と物体との干渉現象は工業的にも重要であり、従来から数多くの研究が行われている^{(1) - (4)}。適正膨張以外の超音速噴流は衝撃波を伴った複雑な噴流構造を有し、物体との干渉によって噴流構造はさらに複雑になる。噴流中の衝撃波や圧力波によって噴流内部や干渉する物体近傍および表面の圧力や温度は複雑に変化するため、溶射やガラスの急速冷却など、物体表面の圧力や温度を適正に制御したい場合には、衝突噴流の噴流構造の解析が不可欠であり、さらに条件によっては噴流中の衝撃波の自励振動が生じて圧力や温度が不規則に変動するため^{(5) - (7)}、解析はより煩雑になる。しかし、大半が円形ノズルを用いた軸対称の噴流を対象としており^{(1) - (4)}、矩形ノズルについての調査は少ない。

一方、矩形ノズルで形成される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変化する **Axis-switching** 現象が起こる⁽⁸⁾。また、矩形噴流は矩形ノズルのアスペクト比の影響も強く表れ、ノズル出口形状の影響がより顕著に現れる。円形のラバルノズルに比べて二次元ノズルは製作が容易で次世代のジェットエンジンや騒音抑制を企図した二次的な周囲流など、一定の需要があるが、矩形ノズルについての調査は少ない。

本研究では、矩形ノズルを用いた場合の超音速噴流と物体との干渉現象の特徴と、円形噴流の場合には特定の条件下で発生する衝撃波の自励振動現象の有無および特性について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

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。本実験では、高さ $h=6.1$ [mm]、幅 $b=4.1$ [mm]、アスペクト比 0.67 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 $x_c=20$ [mm] の位置に設置した。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。

一方、従来の研究より矩形噴流は三次元の噴流構造を有し、その構造はアスペクト比の影響も強く受け、噴流断面の垂直および水平方向の長さが変化する **Axis-switching** 現象が起こることが知られている⁽⁸⁾。そのため、噴流構造の解析は必須であるが、シュリーレン法による可視化実験では限界があるため、本研究では実験と同一の圧力比で矩形ノズルにより形成される自由噴流について、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 $k-\epsilon$ モデルを用いて、圧縮性の定常計算を行った。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シュリーレン写真の一

例を **Fig.4** に示す。図 (a) の場合の圧力比は $\phi=8$, 図 (b) の場合の圧力比は $\phi=10$ であり, 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.4** は瞬間的な

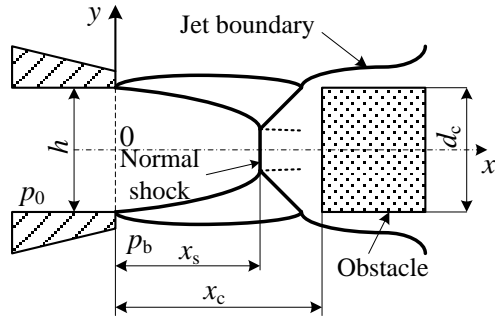


Fig.1 Flow model and symbols used in this study

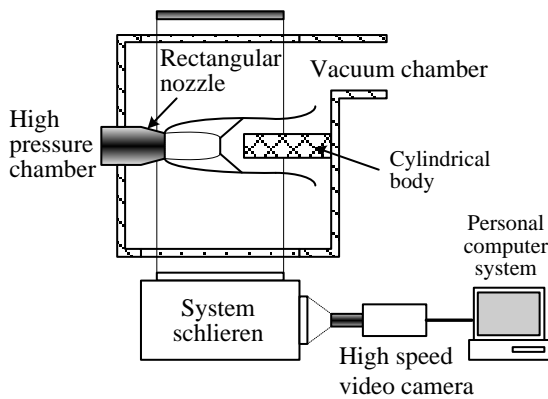


Fig.2 Experimental apparatus used this study

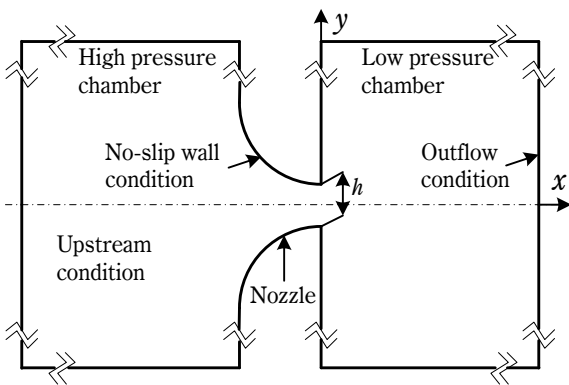
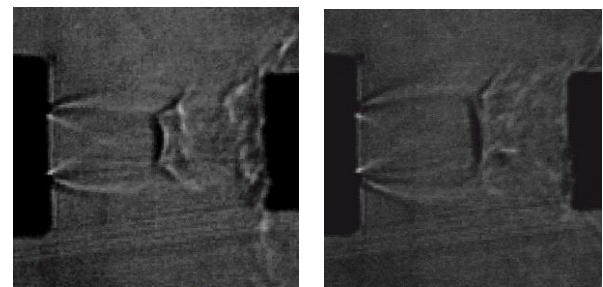


Fig.3 Calculation domain

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 (Standoff shock) の流れ方向の振動を観察でき, 矩形噴流の自励振動現象の発生を確認できた。

数値解析より求めた噴流断面の形状を **Fig.5** に示す。**Fig.5** は円柱体がない場合, すなわち自由噴流の場合の数値解析で, 圧力比は $\phi=8$ 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。

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_c と流れ場の圧力比 ϕ との関係を **Fig.6** に示す。図中のエラーバーは, 衝撃波の自励振動の範囲を表す。また, 図中の実線は円形の自由噴流中の衝撃波



(a) $\phi=8$ (b) $\phi=14$

Fig.4 Typical schlieren photograph ($x_c/h=3.3$)

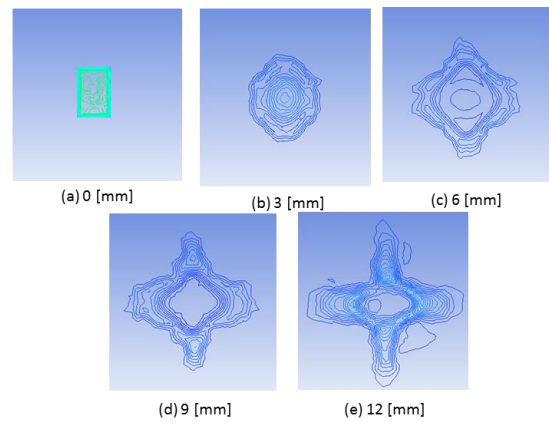


Fig.5 Typical contour maps obtained by numerical analysis ($\phi=8$)

(Mach disk) の形成位置を示す以下のAddyの式⁽⁹⁾ 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 ϕ 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

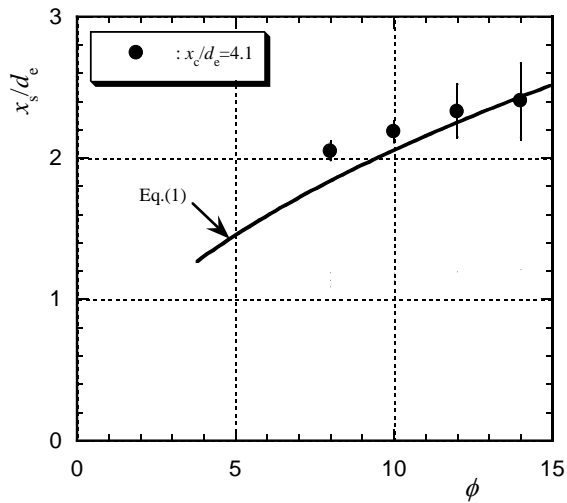


Fig.6 Relation between non-dimensional position of shock wave x_s/d_e and pressure ratio ϕ

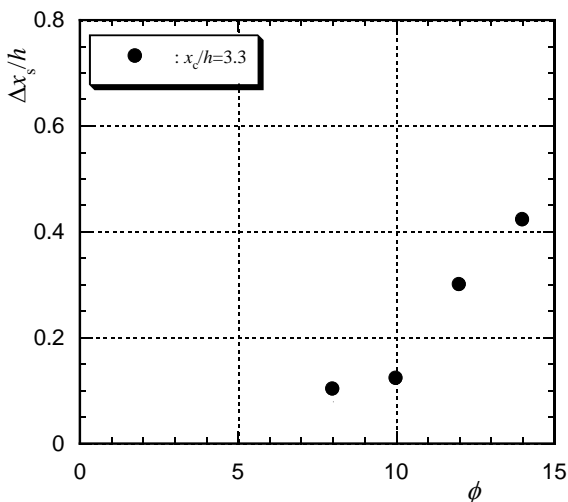


Fig.7 Relation between non-dimensional amplitude of shock wave $\Delta x_s/h$ and pressure ratio ϕ

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の衝撃波 (垂直衝撃波) の形成位置は円形噴流のMachdisk の無次元形成位置と概ね一致する傾向にある。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 ϕ が増加すると増加しており、圧力比 ϕ が自励振動に強く影響することがわかる。

矩形ノズルで形成される垂直衝撃波の振動範囲 $\Delta x_s/h$ と圧力比 ϕ との関係を **Fig.7** に示す。衝撃波の振動範囲はノズルの高さ h で無次元化している。図より、自励振動時の衝撃波の振動範囲は圧力比 ϕ に依存し、圧力比 ϕ が増加するとともに、衝撃波の自励振動範囲 $\Delta x_s/h$ も増加することがわかる。この特徴は円形噴流と同様である。

矩形ノズルで形成される衝撃波の自励振動のストロハル数 S_t と圧力比 ϕ との関係を **Fig.8** に示す。図より、矩形噴流の垂直衝撃波の自励振動時のストロハル数 S_t は圧力比 ϕ の増加に対してわずかに増加傾向を示しており、円形噴流と同様の特性を示す。また、著者らの過去の研究⁽⁷⁾ で求めた円形噴流のMach diskの自励振動のストロハル数 S_t の値とよく一致しており、噴流構造は軸対称ではないが、矩形噴流の垂直衝撃波の自励振動の周波数特性は円形噴流と同等である。しかし、本実験での円柱体の設置位置はノズル出口から比較的離れており、噴流との干渉に対する円柱体の相対的な影響が少ないことが影響している可能性があり、円柱体の設置位置を変化させた実験を行って検証する必要がある。さらに従来の研究結果と比較すると、出口マッハ数が $M_e=1$ の円柱体との干渉の場合の結果と本実験および著者らの過去の研究結果⁽⁷⁾ と一致しており、自励振動のストロハル数 S_t は一定の範囲内にあると考えられる。さらに円柱体と垂直平

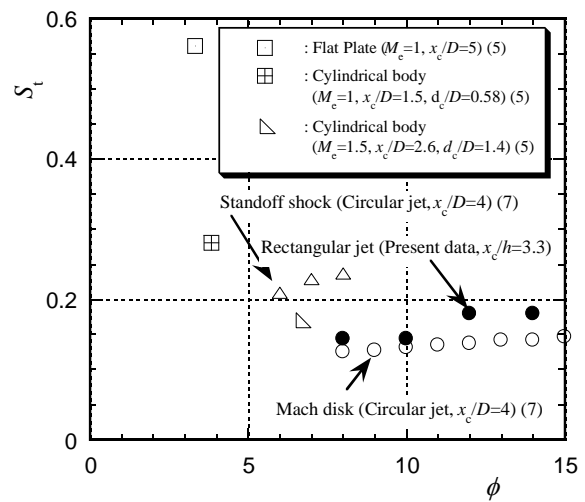


Fig.8 Relation between Strouhal number S_t and pressure ratio ϕ

板との干渉の結果と比較すると、円柱体との干渉の場合の自励振動のストロハル数 S_f は垂直平板との干渉の場合の自励振動のストロハル数 S_f より小さく、半分程度であり、干渉する物体の形状も大きく影響する。これは、特に垂直平板との干渉の場合、流れが 90度曲げられ、垂直平板前方に形成される衝撃波の構造が大きく変化するためと考えられる。

以上の結果より、矩形噴流と円柱体との干渉の場合でも、条件によって垂直衝撃波の自励振動が発生し、流れ場の圧力比 ϕ の影響を受けることが明らかとなった。

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、矩形噴流の断面形状は流れ場の圧力比 ϕ の影響を受け、さらに圧力比 ϕ 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。
- (2) 矩形噴流中に形成される垂直衝撃波の形成位置 x_s は流れ場の圧力比 ϕ に依存し、流れ場の圧力比 ϕ 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。これは、本実験の円柱体の設置位置が比較的下流側に位置することが影響していると考えられる。
- (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。また、垂直衝撃波の無次元自励振動範囲 $\Delta x_s/h$ は流れ場の圧力比 ϕ に依存し、円形噴流と同等の特性を示す。
- (4) 矩形噴流が円柱体に干渉する場合の噴流中の垂直衝撃波の自励振動のストロハル数 S_f は圧力比 ϕ の増加に対してわずかに増加傾向を示し、円形噴流と同様の特性を示す。また、円形噴流の **Mach disk** の自励振動のストロハル数 S_f の値とよく一致しており、矩形噴流の垂直衝撃波の自励振動の周波数特性は円形噴流と同等である。さらに、垂直平板との干渉の場合の自励振動のストロハル数 S_f より小さく、干渉する物体の形状も大きく影響する。

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) 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., Otake, 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.

(2018年11月 5日 受理)