

衝撃波管風洞により形成されるパルスジェットの特性に及ぼす風洞圧力比の影響

安信 強, 乙部由美子, 島津公紀, 樫村秀男

Effect on Pressure Ratio of Wind Tunnel for Characteristics of Pulse Jet Formed of Shock Tunnel

Tsuyoshi YASUNOBU, Yumiko OTOBE, Masaki SHIMAZU and Hideo KASHIMURA

Abstract

When the propagating shock wave in the shock tunnel reaches at the supersonic nozzle settled at the tube end, the supersonic jet is momentarily formed. As the shock wave propagates intermittently in the shock tunnel, the intermittent jet, namely, the pulse jet is formed from the supersonic nozzle. The pulse jet has a different feature in comparison with the continuously jet. But, it seems that the characteristic of the pulse jet have to be more cleared to apply for industrial field. This paper aims to investigate the characteristic of the pulse jet by the experiment. The measurement of a pressure fluctuation in the shock tunnel caused by the propagating pressure wave and the flow visualization of the pulse jet are synchronously accomplished using the high-speed video camera and the pressure transducer. From the experimental results, the effect of a pressure fluctuation in the shock tunnel for pulse jet is discussed.

Keywords : Pulse Jet, Mach disk, Shock Tunnel, Flow Visualization, Schlieren Method

1. はじめに

間欠的に形成される噴流（以下、本研究ではパルスジェットと呼称）は連続的に形成される噴流とは異なった特性を持つと考えられ、例えばパルスジェットフィルタ⁽¹⁾や表面に付着した微粒子の除去⁽²⁾などで利用されている。また、ジェットエンジンに応用すると通常のジェットエンジンよりも比較的簡単な構造となるため、低コストで高効率なジェットエンジン⁽³⁾として注目されていた。しかし、定常的な噴流と異なり、パルスジェットの特性や、定常的な噴流の特性との相違など、パルスジェットについての系統的な調査は十分とは言えない。

一方、衝撃波管風洞は、衝撃波管の低圧室の管端に超音速ノズルを取り付け、低圧室内に形成された流れをさらに加速させる装置である⁽⁴⁾。この風洞では、隔膜を破膜後、低圧室内に形成された衝撃波が風洞内の圧力が均一になるまで風洞内を繰り返し伝ばするため、そのたびに超音速ノズルから気体が間欠的に噴出し、パルスジェットを生成させることができる。そこで本研究では、衝撃波管風洞を用いてパルスジェットを形成させ、パルスジェットの特性について、実験的に調査することを目的とする。そのため、本実験ではパルスジェットの可視化と超音速ノズル直前の圧力変動の同期計測を行い、風洞内の圧力と形成されるパルスジェットとの関係を調査した。そして、パルスジェット中のマッハディスクの形成位置および直径に着目し、風洞内の圧力変動との関係、および定常的な噴流の特性との相違について考察する。

2. 実験装置および実験方法

パルスジェットの模式図と使用記号をFig.1に示す。こ

の図は後述する可視化結果を元に作成しており、図(a)は圧縮と膨張を繰り返すセル構造を示している。このような噴流構造は、後述する初期圧力比 p_4/p_1 が低い場合に観察され、初期圧力比 p_4/p_1 が増加すると、図(b)に示すようにマッハディスクやバレル衝撃波を伴った噴流構造となる。よって、間欠的に形成されるパルスジェットの噴流構造は、定常的な噴流の場合とほぼ同一であることがわかる。また、本研究では、ノズル出口直径を D 、図に示すようにノズル出口から第1セルもしくはマッハディスクまでの距離を L_s 、セルもしくはマッハディスクの直径を D_s とそれぞれ定義し、この後の考察では出口直径で無次元化する。

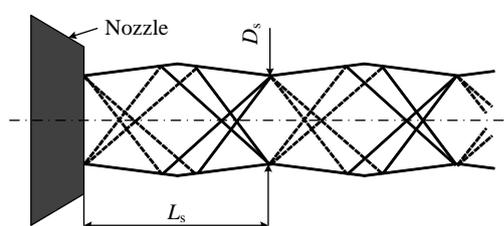
本研究で用いた実験装置の系統図をFig.2に示す。本実験装置は高圧室（内径52.7mm、長さ1mの鋼製円管）、低圧室（内径52.7mm、長さ3mの鋼製円管）、測定部、観測部、真空タンクより構成されており、コンプレッサーと真空ポンプを使用して高圧室と低圧室の圧力を設定する。また、パルスジェットを形成させるノズルは観測部に設置し、本研究では出口直径 $D=2\text{mm}$ の先細ノズルを使用した。さらに、観測部の上流の測定部には圧力センサの取り付け穴があり、圧力センサを用いて測定部内の圧力変動を測定することができる。

次に計測では、圧力センサによる測定部内の圧力変動の計測と、システムシュリーレン装置(カトウ光研製、100L)によるパルスジェットの可視化を行った。特に今回の実験では、測定部内の圧力変動によりジェットの大きさなどが変化するため、可視化画像を撮影する高速度カメラ(Photron製、FASTCAM SA 1.1)と圧力センサを同期させ、撮影された映像と圧力波形をコンピュータに記録した。本実験で使用した高速度カメラは最速675,000fpsでの撮影が可能であり、時間とともに変化する

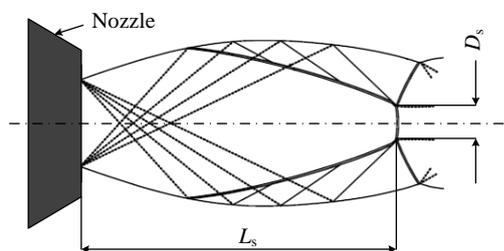
パルスジェットの見視化画像を撮影することが可能である。また、高速度カメラによる撮影と圧力変動の同期計測は、専用のソフトを用いて行った。

同期計測後のPC画面の一例をFig.3に示す。図に示す画面の左側は高速度カメラで撮影したパルスジェットの見視化画像を、右側は圧力センサで計測したノズル上流の圧力変動を表わしており、右側の圧力変動の図の縦の実線は、左側に表示された見視化画像と同時刻の圧力を示している。本研究ではこのような同期計測結果を用いて、ノズル上流の圧力と見視化画像とを対応させて解析した。

次に、実験条件については、作動気体を空気とし、衝撃波管風洞の高圧室圧力を $p_4=0.3$ [MPa] に固定して低圧室圧力 p_1 を変化させて実験を行った。具体的には



(a) Cell structure



(b) Structure with Mach disk and barrel shock

Fig. 1 Schematics of jet structure of pulse jet

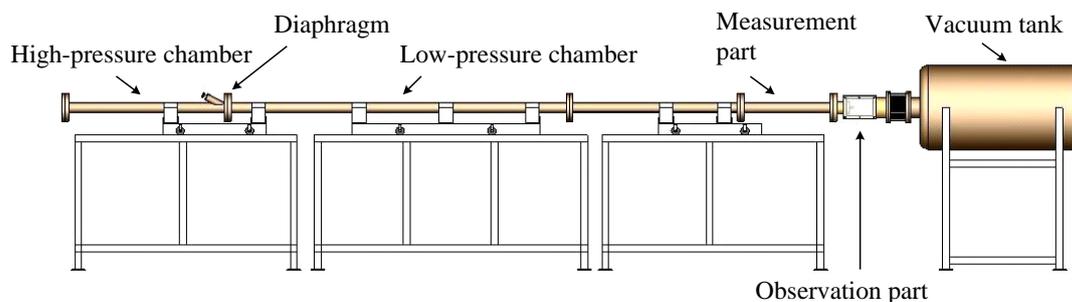


Fig.2 Experimental apparatus used in this study

高圧室圧力と低圧室圧力との初期圧力比が $p_4/p_1=20, 25, 30$ となるように低圧室圧力を変化させ、パルスジェットの見視化とノズル上流の圧力の同期計測を行った。

3. 実験結果と考察

本実験で得られた、測定部の圧力変動の測定結果をFig.4に示す。図(a)は初期圧力比 $p_4/p_1=20$ 、図(b)は $p_4/p_1=30$ の場合の結果を示している。いずれの図でも圧力が繰り返し変動し、圧力が低下したのちに急激に圧力が上昇し、局所的な圧力のピークが観察される。これは、観測部に取り付けられたノズルの内径が小さいため、低圧室内を下流方向に伝ばした衝撃波が観測部でほとんど反射して反射衝撃波を形成するためである。また、初期圧力比 p_4/p_1 が増加すると圧力値は低下し、圧力変動の変動幅が増加することがわかる。なお、本研究では、図に示すように局所的な圧力のピーク値を時刻順に記号 p_{ri} ($p_{r1} \sim p_{r6}$) で定義する。

見視化画像の一例をFig.5に示す。この図は初期圧力比 $p_4/p_1=20$ での見視化結果であり、図(a)から図(c)の記号 p_{r1} 、 p_{r2} 、 p_{r6} は、Fig.4 (b) の同一記号で示す圧力ピーク時の撮影結果を示している。これらの図から、 $p_4/p_1=20$ でのパルスジェットはマッハディスクとバレル衝撃波を伴った噴流構造を有し、 p_{r1} 、 p_{r2} 、 p_{r6} と変化する

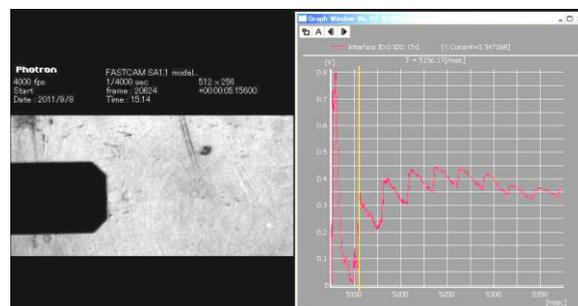
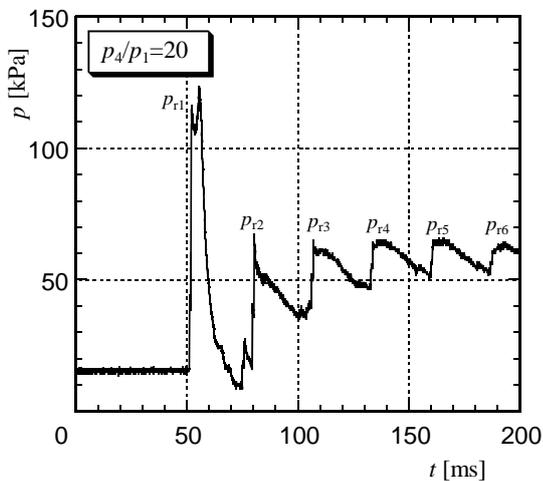


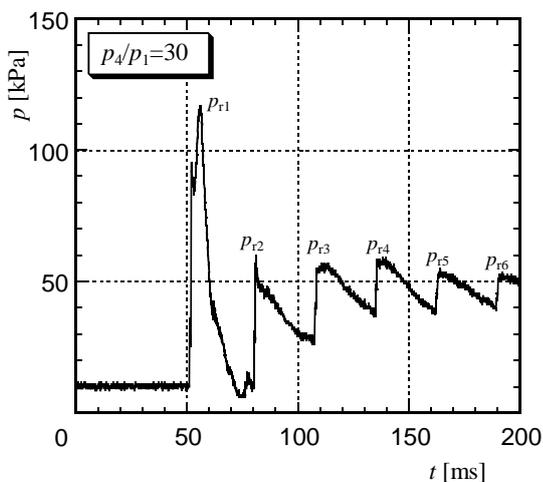
Fig.3 Typical display of PC at synchronously measurement

るにつれて噴流の大きさが減少することがわかる。これは、圧力のピーク値が p_{r1} , p_{r2} , p_{r6} と変化するにつれて圧力の変動幅が減少するためである。

パルスジェット中のマッハディスクの形成位置および直径と圧力のピーク値との関係をFig.6に示す。図(a)は無次元化されたマッハディスクの形成位置 L_s/D を、図(b)はマッハディスクの直径 D_s/D を示している。また、図の横軸は、Fig.4に示す圧力のピーク値を低圧室圧力 p_1 で無次元化した値を示している。図(a)より、同一の初期圧力比 p_4/p_1 では圧力のピーク値 p_{ri}/p_1 が増加すると形成位置 L_s/D も増加、すなわち、噴流の大きさが大きくなることがわかる。また、初期圧力 p_4/p_1



(a) $p_4/p_1=20$



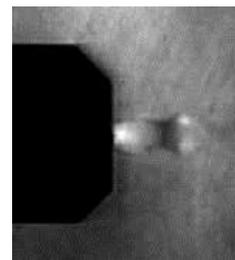
(b) $p_4/p_1=30$

Fig.4 Typical pressure change with time of shock tunnel

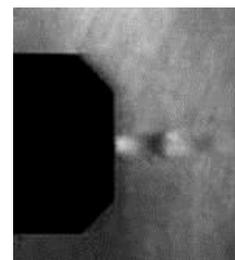
を増加させると形成位置 L_s/D の最大値も増加する傾向を示すが、圧力のピーク値 p_{ri}/p_1 が同一の場合には、顕著な相違は観察されない。

次に、図(b)のマッハディスクの直径 D_s/D に着目すると、定性的な傾向は図(a)の形成位置 L_s/D とよく一致する。よって、圧力のピーク値 p_{ri}/p_1 および初期圧力比 p_4/p_1 が増加するとパルスジェット中のマッハディスクの形成位置 L_s/D と直径 D_s/D は増加し、噴流の大きさが大きくなることがわかる。

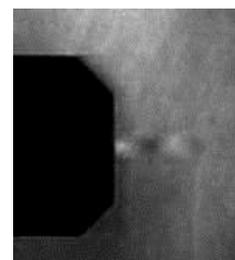
パルスジェット中のマッハディスクの形成位置および直径と初期圧力比との関係をFig.7に示す。なお、Fig.6で述べたように、圧力のピーク値 p_{ri}/p_1 が変化するとマッハディスクの形成位置および直径も変化する。そのため、Fig.7では、Fig.5の2番目の圧力のピーク値 p_{r2} での結果を示している。図(a)より、多少の変動が観察されるが、初期圧力比 p_4/p_1 が増加すると、マッハディスクの形成位置 L_s/D も増加することがわかる。これは、Fig.4で示したように、 p_4/p_1 が増加すると圧力



(a) p_{r1}



(b) p_{r2}



(c) p_{r6}

Fig.5 Typical schlieren pictures of pulse jet ($p_4/p_1=20$)

の変動幅が増加するためである。

次に、図(b)のマッハディスクの直径 D_s/D においても、図(a)の形成位置 L_s/D と同様に初期圧力比 p_4/p_1 が増加するとマッハディスクの直径 D_s/D も増加する。

パルスジェット中のマッハディスクの形成位置と直径との関係をFig.8に示す。図中の実線は、次式で示す定常の自由噴流中のマッハディスクの形成位置および直径に関するAddyの実験式⁽⁵⁾より圧力比 ϕ を消去して求めた結果である。

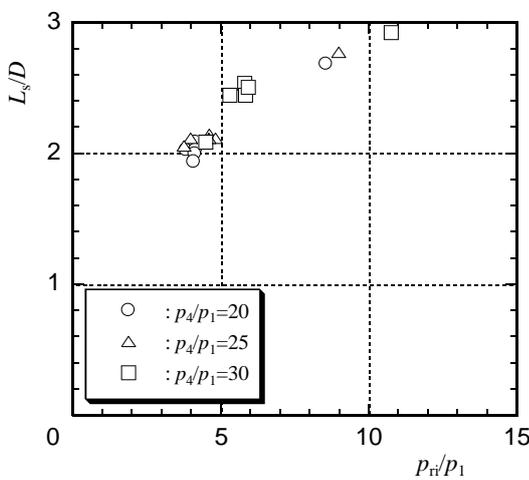
$$x_s / D = 0.65\sqrt{\phi} \tag{1}$$

$$D_s / D = C_1\sqrt{\phi - C_2} \tag{2}$$

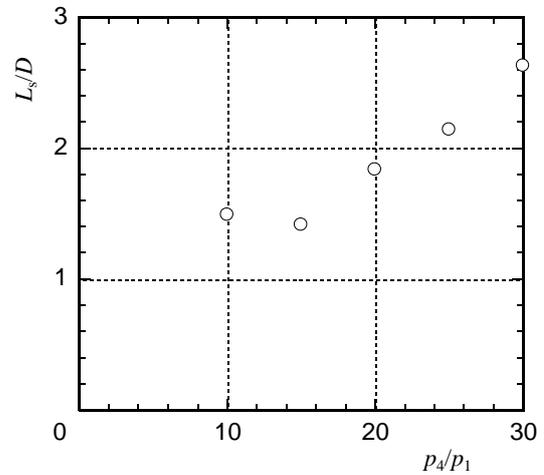
ここで、記号 ϕ はノズル上流の貯気圧 p_0 とノズル下流の背圧 p_b との圧力比 ($\phi=p_0/p_b$) である。

また、式(2)において、先細ノズルの場合、 $C_1=0.36$ 、 $C_2=3.9$ であり、式(1)と式(2)はノズル出口マッハ数が $M_e=1$ の場合に適用できる。

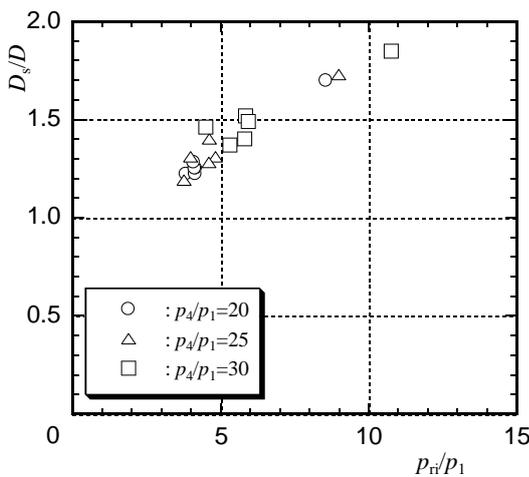
図より、マッハディスクの形成位置 L_s/D が増加するとマッハディスクの直径 D_s/D も増加することがわ



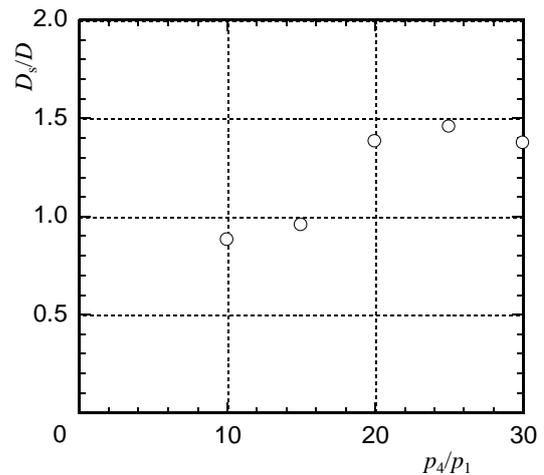
(a) L_s/D



(a) L_s/D



(b) D_s/D



(b) D_s/D

Fig.6 Relation between position L_s/D or diameter D_s/D of Mach disk and local maximum pressure p_{4i}/p_1

Fig.7 Relation between position L_s/D or diameter D_s/D of Mach disk and initial pressure ratio p_4/p_1

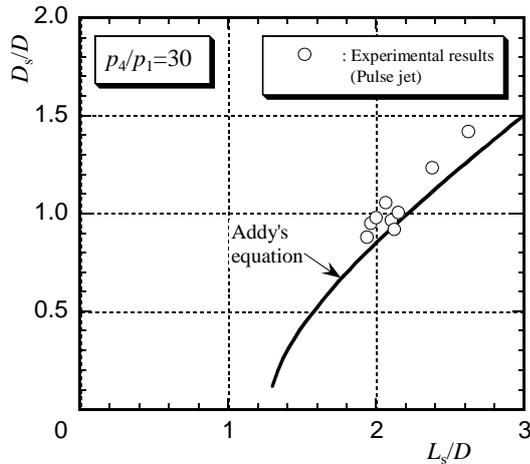


Fig.8 Relation between position L_s/D and diameter D_s/D of Mach disk ($p_4/p_1=30$)

かる。これは、実線で示す定常の自由噴流中のマッハディスクと同一の傾向であり、間欠的に形成されるパルスジェットにおいても、一度、噴流が形成されると、定常の噴流とほぼ同一の性質を示すと考えられる。よって、パルスジェットにおいても、一度、噴流が形成されるとAddyの実験式による予測が可能と考えられる。

4. 結論

本研究では、衝撃波管風洞を用いてパルスジェットを形成させ、パルスジェットの特性について実験的に調査した。特に本実験では、パルスジェットの可視化と超音速ノズル上流の圧力変動の同期計測を行い、風洞内の圧力と形成されるパルスジェットとの関係を調査した。得られた結果を以下に要約する。

- (1) 衝撃波管風洞を用いたパルスジェットの生成が可能であり、さらにパルスジェットの可視化とノズル上流の圧力変動の同期計測により、ノズル上流の圧力変動とパルスジェットとの関係を明らかにすることができた。
- (2) ノズル上流の圧力のピーク値 p_n/p_1 が増加すると、パルスジェット中のマッハディスクの形成位置もしくは第一セルの長さ L_s/D とマッハディスクもしくは第一セルの直径 D_s/D は増加する。
- (3) パルスジェット中のマッハディスクの形成位置もしくは第一セルの長さ L_s/D が増加すると、マッハディスクもしくは第一セルの直径 D_s/D も増加する。

- (4) パルスジェット中のマッハディスクの形成位置もしくは第一セルの長さ L_s/D とマッハディスクもしくは第一セルの直径 D_s/D との関係は、定常の自由噴流中のマッハディスクと同一の傾向であり、Addyの実験式による予測が可能である。また、間欠的に形成される噴流であるパルスジェットも、形成された状態では定常の自由噴流の性質に近いと考えられる。

参考文献

- (1) J. Sievert et al., The Effect of Cleaning System Parameters on the Pressure Pulse in a Pulse-Jet Filter, Computational Analysis and Control, 2, pp.647-662 (1987).
- (2) 後藤邦彰, ジェット変動を制御した高効率除去ノズルの開発と粒子混入による除去効果促進, 岡山大学大学院自然科学研究科平成19年度研究助成報告, (2008).
- (3) 河野通方 他3名, 最新内燃機関, 朝倉書店, (1998), pp.168-169.
- (4) 松尾一泰, 圧縮性流体力学, 理工学社, (1994), pp.222-226.
- (5) Addy A. L., Effects of Axisymmetric Sonic Nozzle Geometry on Mach Disk Characteristics, AIAA J., Vol.19, No.1, (1981), pp.121-122.

(2011年11月7日 受理)