

# 円筒内壁に衝突する放射状に広がる不足膨張噴流の圧力計測

## Pressure measurement of inner wall of cylinder on which underexpanded radial jet impinges

○西村 宣彦 (東電大) 山崎 智史 (東電大) 遠藤 正樹 (東電大) 榎原 洋子 (東電大)  
Nobuhiko NISHIMURA, Satoshi YAMAZAKI, Masaki ENDO, Yoko SAKAKIBARA,  
Tokyo Denki University, Ishizaka, Hatoyama-machi, Hiki-gun, Saitama 350-0394

### 1. 序論

不足膨張噴流は超音速噴流の一種であり、ノズルから大気中に噴出される噴流である。不足膨張噴流はノズル出口面からマッハ数  $M=1$  で噴出した後、加速を伴う膨張波と減速を伴う圧縮波を周期的に繰り返す非一様な樽型の構造をとる。不足膨張噴流が見られる例として、航空機のジェットエンジンの排気噴流がある。工業分野では熱強化ガラスの加工時に吹き付ける冷却噴流や、レーザー加工機に用いられるアシストガスなどにも不足膨張噴流がみられる。

このように不足膨張噴流は、幅広い分野で用いられる。しかし、不足膨張噴流はその特徴的な流れ場から騒音や振動を伴うことが知られている。この振動により引き起こされる問題として、レーザー加工機では加工時間の増加や加工精度の低下が知られている。そのためレーザー加工機などの流れ場を模擬し、平板に衝突する不足膨張噴流の振動・騒音問題に関する研究が以前より行われている<sup>(1)</sup>。

一方で内燃機関の吸気弁や、高圧配管系における圧力調整弁においては、放射状に広がる不足膨張噴流が平板ではなく円筒内壁に衝突する。そして、この場合でも振動および騒音が生じることが報告されている<sup>(2)</sup>。しかし、円筒内壁に衝突する不足膨張噴流を対象とした研究事例は少ない。

そこで本研究では円筒内壁に衝突する放射状不足膨張噴流を対象として研究を行う。2つの円管からなるスリットノズルを設置しその間隙部から噴流を噴出させ、放射状に広がる不足膨張噴流を再現する。また、円筒内壁を持つ被衝突物をノズルを覆うように設置し、壁面が衝突噴流によって受ける圧力および噴流より放射される音の計測を行う。また、シャドウグラフ法による流れ場の可視化も併せて行う。計測結果の解析を行い、それらの振動形態および振動形態と流れ場の関連性について調査することを目的とする。

### 2. 実験方法

#### 2.1 配管系

本実験ではタンク内のよどみ点圧力を  $p_0$ 、大気圧を  $p_a$  とする。コンプレッサによって圧縮された空気は防音室内にある2つの高圧タンクに供給される。よどみ点圧力  $p_0$  はデジタルマノメータによって測定され、2つのバルブでタンク内のよどみ点圧力を等しくなるように調整する。また、本実験ではよどみ点圧力を大気圧で無次元化したノズル圧力比  $p_0/p_a$  を、2.0 から 4.8 まで 0.2 刻みで変化させ計測および可視化を行う。

実験に使用するスリットノズルは、外径  $D=12$  mm、肉厚  $t=1$  mm の2つの向かい合った円管からなる。2つの高圧タンクの端部に設置された円管は、管端部において  $b=2$  mm の隙間を設けている。高圧タンクから供給された空気は放射状に噴出する。ノズル内部の形状は、ノズル出口面において噴流の速度が音速になるように設計されている。

#### 2.2 圧力計測法

圧力計測に用いる被衝突物の円筒面の内径は  $D_a=28$  mm、

厚みは  $w=20$  mm である。円筒面には計測孔を周方向に等間隔に8箇所設け、測定点 A から測定点 H と設定する。本実験では、測定点 A, C, E, G に圧力センサを取り付け壁面圧力  $p_w$  の計測を行った。

圧力センサから検出した電圧の変動量は、アンプによって増幅される。その後、12 bit 分解能の A/D ボードで変換され、コンピュータに記録される。本実験では壁面圧力の計測回数は10回、サンプリング周波数は10 MHz である。

### 2.3 音圧計測法

本実験では、ノズル出口面から  $L=750$  mm、噴流軸からの角度  $\theta=30^\circ$  の位置にマイクロフォンを設置した。マイクロフォンから検出した電圧の変動量は、圧力計測方法と同様にアンプ、A/D ボードを介しコンピュータに記録される。本実験では音圧の計測回数は30回、サンプリング周波数は1 MHz である。

### 2.4 可視化法

本実験ではシャドウグラフ法により流れ場を可視化した。可視化装置の光源には閃光時間 180 ns のナノパルスライトを使用した。光源から発せられた光はコンデンサレンズによって集光され、ピンホールを通り点光源となる。その後、コリメータレンズによって平行光となり、平行光はミラーによって  $90^\circ$  方向に反射される。反射された平行光は流れ場をノズルの長手方向に通過する。その後、同様の向かい合ったミラーによってカメラ方向に反射し、コリメータレンズによって集光し、カメラレンズに入り可視化される。

## 3. 実験結果

### 3.1 平均壁面圧力計測結果

壁面圧力  $p_w$  の変動を計測する前段階として、平均壁面圧力  $\bar{p}_w$  を計測した。ここで、計測は各ノズル圧力比、各測定点において5回ずつ行い、ノズル圧力比ごとに平均化した。計測結果を図1に示す。図1より、平均壁面圧力は  $p_0/p_a=3.2$  の前後で、ノズル圧力比に対する変化量が変化した。

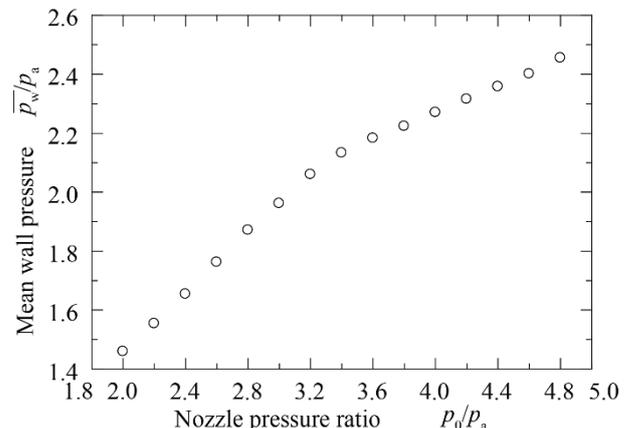


Fig. 1 Mean wall pressure

### 3.2 FFT 解析結果

壁面圧力  $p_w$  の変動および音圧の FFT 解析結果の例としてノズル圧力比  $p_0/p_a = 3.4$  における結果を図 2 に示す. 結果より各ノズル圧力比において壁面圧力および音圧それぞれに卓越した周波数成分が確認できる.

また各ノズル圧力比において 0 kHz から 10 kHz に確認できる 2 つの卓越した周波数成分は, 壁面圧力と音圧で良い一致を示した. ここでそれらのうち周波数の低いものを基本周波数  $f_{d1}$  と呼称する. また, 前述の二つの周波数成分のうち高いものは基本周波数を 2 倍した  $2f_{d1}$  と良い一致を示した. よって, これを 2 倍基本周波数  $f_{d2}$  と呼称する.

図 3 に各ノズル圧力比  $p_0/p_a$  における壁面圧力  $p_w$  の変動および音圧それぞれの卓越した周波数成分  $f_d$  を示す. ここで, 円形のプロットは壁面圧力における基本周波数  $f_{dp}$  を, 逆三角形のプロットは音圧における基本周波数  $f_{ds}$  を示している. また, 黒いプロットは基本周波数  $f_{d1}$  を, 赤いプロットは 2 倍基本周波数  $f_{d2}$  を, 青いプロットは基本周波数を 2 倍した  $2f_{d1}$  を示している. 図 3 より本実験におけるノズル圧力比  $p_0/p_a$  の全域において, 壁面圧力における基本周波数  $f_{dp}$  は音圧における基本周波数  $f_{ds}$  と一致していることが確認できる. また, 2 倍基本周波数  $f_{d2}$  が, 基本周波数の 2 倍である  $2f_{d1}$  と一致していることも確認できる. このことから, 壁面圧力および音圧は同一の基本周波数  $f_{d1}$  で変動しているといえる.

また, 基本周波数  $f_{d1}$  は, 平均壁面圧力比  $\bar{p}_w$  と同様にノズル圧力比  $p_0/p_a$  に対して直線的に変化するものの, 圧力比  $p_0/p_a = 2.8$  でその傾きが変化した. また, 前述したように平均壁面圧力  $\bar{p}_w$  は圧力比  $p_0/p_a = 3.2$  で傾きが変化した.

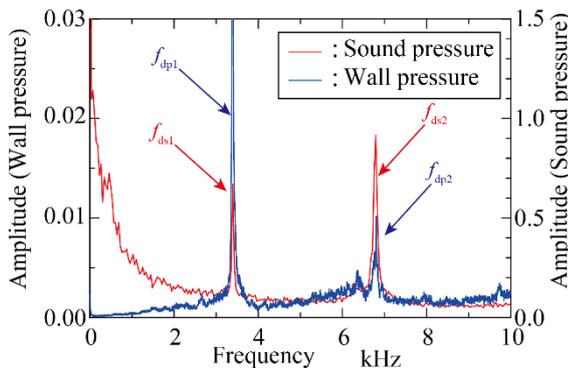


Fig. 2 Spectrum analysis ( $p_0/p_a = 3.4$ )

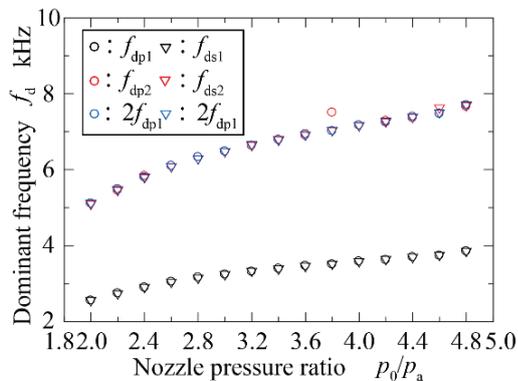
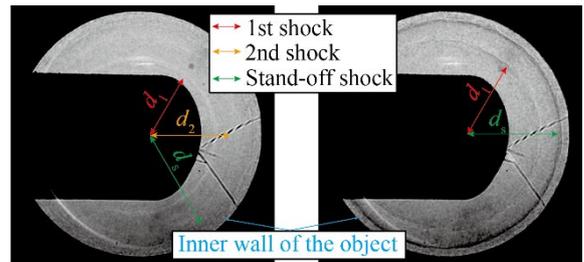


Fig. 3 Dominant frequency

### 3.3 可視化結果

図 4 に  $p_0/p_a = 3.0, 4.8$  における平均化写真を示す. 平均化写真は, 光源の閃光時間 180 ns の露光から撮影された時

間平均画像 30 枚を平均化した画像であり, グレースケールで示される. 可視化結果より, ノズル圧力比  $p_0/p_a$  が 2.8 以上の場合において, ノズルと同心円状に広がる衝撃波が確認できる. ここで半径の小さいものから順に第 1, 第 2 衝撃波リングと呼称する. また, 内壁近傍に生じるものを離脱衝撃波リングと呼称する. ここで, それらの直径を  $d_1, d_2, d_s$  とする. 図 5 に衝撃波リングの径とノズル圧力比を示す. 図 5 より,  $d_1$  と  $d_2$  はノズル圧力比の上昇に伴って直線的に増加した. また,  $d_s$  もノズル圧力比の上昇に伴って増加したが,  $p_0/p_a = 3.8$  において離脱衝撃波が第 2 衝撃波と一体化し, その径が減少した.  $p_0/p_a = 3.8$  よりもさらにノズル圧力比を上昇させると, それに伴い径もわずかに増加したが, その増加量は衝撃波の一体化前より減少した.



(a)  $p_0/p_a = 3.0$  (b)  $p_0/p_a = 4.8$   
 Fig. 4 Visualization photograph of average

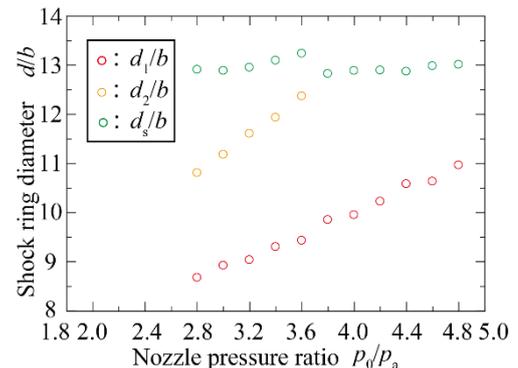


Fig. 5 Shock ring diameter

## 4. 結論

- 壁面圧力は変動し, 2 つの卓越した周波数成分を持つ. また, それらは音圧の卓越した周波数成分と良い一致を示した.
- ノズル圧力比の上昇に伴い, 壁面圧力と音圧の卓越周波数もわずかに上昇した. また, その上昇量が変化するノズル圧力比から, 3 つの衝撃波リングが確認された.
- ノズル圧力比の上昇に伴い, 平均壁面圧力も上昇した. しかし, 圧力比  $p_0/p_a = 3.2$  においてその傾きが変化した.
- ノズル圧力比を 3.6 よりも上昇させると, 離脱衝撃波リングが第 2 衝撃波リングと一体化した.

## 5. 文献

- Gojon, R., Bogey, C., “Flow structure oscillations and tone production in underexpanded impinging round jets”, AIAA Journal, Vol.55, No.6, (2017), pp.1792-1805.
- 寺地 慶訓ほか. “蒸気加減弁に発生する流体振動に関する研究”, 日本機械学会論文集 B 編, 70 巻, 690 号, (2004), pp.371-379.