不足膨張噴流が円筒内壁に衝突する際に生じるスクリーチ周波数と 噴流マッハ数の関係

Relations between screech frequency and jet Mach number of underexpanded jet impinging on cylindrical inner wall.

○大森 達也 (東電大) 山崎 智史 (東電大) 遠藤 正樹 (東電大) 榊原 洋子 (東電大) Tatsuya OMORI, 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、臨界圧力比よりも高い圧力比で先細ノズルから大気中に気体を噴出させると形成する。不足膨張噴流はノズルからマッハ数 M=1で噴出した後に加速を伴う膨張と減速を伴う圧縮が周期的に繰り返されることで、非一様な構造を持つことが知られている。

この不足膨張噴流がみられる例として、航空機のジェットエンジンの排気噴流が挙げられる(1). また、工業分野でも熱強化ガラス製造時に吹き付ける冷却噴流や、レーザー加工で用いられるアシストガスなどに不足膨張噴流がみられる(2). 不足膨張噴流を伴う流れ場からは、騒音が発生し振動を伴う衝撃波が形成されることが知られている. この振動は、工作機械において加工時間の増加や加工精度の低下といった問題を引き起こすため、不足膨張噴流の振動や騒音を低減するための研究が以前から行われている.

また、内燃機関の吸気弁や、高圧配管系の圧力調整弁においても放射状に広がる不足膨張噴流が円筒内壁に衝突する。このような場合でも振動および騒音が生じることが知られている。特に、内燃機関では自励振動する流れ場の影響で燃料の混成や、燃焼に弊害をもたらすことが懸念されている⁽³⁾。そのため、円筒内壁に衝突する不足膨張噴流に関する研究は重要である。

そこで、本研究では不足膨張噴流の中でも円筒内壁に衝突する放射状に広がる不足膨張噴流を対象として研究を行う。本研究では2つの円管を向かい合わせて構成されるラジアルノズルを設置し、その間隙部b=2 mm 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、円筒状の内壁を持つ被衝突物をノズルを覆うように設置し、被衝突物に衝突した際の音圧を計測する。計測した結果の解析を行うことで、放射状に広がる不足膨張噴流が円筒内壁におよぼす音圧について調査することを目的とする。

2. 実験装置および実験方法

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,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を行う。

実験に使用するラジアルノズルは、外径 D=12 mm、肉厚 t=1 mm と、外形 D=16 mm、肉厚 t=1 mm の 2 種類のノズルを用いており、それぞれ 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 被衝突物

円筒内壁に衝突する不足膨張噴流を再現するためにノズルを覆う被衝突物を設ける。その概略を図1に示す。被衝突物の寸法は、長さw=20 mm、円筒面の内径が $D_a=28$ mm であり、圧力測定を行うための直径0.8 mm の測定孔が8 か所設けられている。

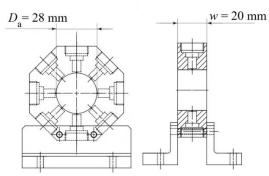


Fig. 1 Schematic view of the cylindrical object

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 $\theta=30^\circ$ 、 60° 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、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 回とし、サンプリング周波数は 1 MHz、測定時間は約 0.26 ms である。

3. 実験結果

3.1 12 mm ノズルでの FFT 解析結果

12 mm ノズルを用いて,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,放射音の測定を圧力比ごとに 30 回行った.各条件において得られたデータをそれぞれ FFT 解析し,平均化を行うことで放射音の持つ卓越した周波数成分を得た.図 2 には圧力比 p_0/p_a =4.6 および 3.2 の角度 θ = 60° で得られた FFT 解析結果を示す.縦軸は音圧,横軸は周波数である.

解析結果より、各圧力比において、5 つの卓越した周波数成分を確認でき、それらを周波数が低いほうから f_{ds1} , f_{ds2} , f_{ds3} , f_{ds4} , f_{ds5} とする. 圧力比 p_0/p_a が 2.6 までは f_{ds4} が最大の音圧となったが、圧力比 2.8 からは f_{ds3} が最大となることを確認した. また、圧力比の増加とともに f_{ds4} は減少するが、圧力比が 3.2 を超えると再び上昇する現象を確認した.

この現象は他の周波数成分にも見られ、音圧は圧力比によって激しく変化することを確認した.

角度 θ = 30°, 60° において、ノズル圧力比と卓越周波数 f_{ds1} , f_{ds2} , f_{ds3} , f_{ds4} , f_{ds5} との関係を図 3 に示す.

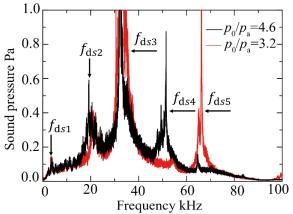


Fig. 2 FFT Analysis (12 mm)

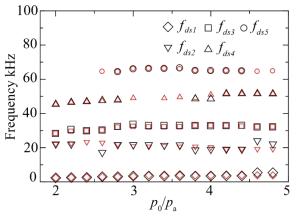


Fig. 3 Relation between frequency and pressure ratio (12 mm)

図3では黒枠のマークが30°、赤枠のマークが60°の結果である。この結果より、角度 θ =30°、60°において、卓越周波数は概ね一致しているため、角度によって卓越周波数の変化がないことがわかる。また、圧力比3.2付近では両方の角度で卓越周波数 f_{ds4} の確認ができないことが示された。

3.2 16 mm ノズルでの FFT 解析結果

 $12 \, \text{mm}$ ノズルと同様に $16 \, \text{mm}$ のノズルを用いて同様の実験および解析を行った. 図 4 には角度 $\theta = 60^\circ$, 圧力比 p_0/p_a =4.6 および 3.2 での FFT 解析結果を示す.

解析結果より、4つの卓越した周波数成分が確認できた.これらの周波数成分も周波数が低いほうから f_{ds1} 、 f_{ds2} 、 f_{ds3} 、 f_{ds4} とする. 16 mm ノズルにおいても 12 mm ノズルと同様に、圧力比によって音圧が変化する周波数成分が確認できた.また、12 mm ノズルの結果と比較して、音圧が低い傾向がみられた.この原因としては、フィードバックループを引き起こす円筒内に存在する衝撃波セルの数が 16 mmのほうが少ないためだと考えられる.また、卓越した周波数成分も 12 mm と異なっており、3 kHz から 5 kHz 付近に存在した f_{ds1} が 16 mm ノズルでは確認できず、また、78 kHz 付近に卓越した周波数を確認した.

角度 $\theta = 30^{\circ}$, 60° において、ノズル圧力比と卓越周波数 f_{ds1} , f_{ds2} , f_{ds3} , f_{ds4} との関係を図 5 に示す.

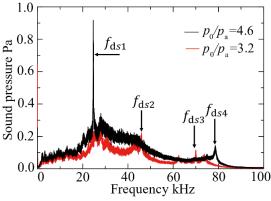


Fig. 4 FFT Analysis (16 mm)

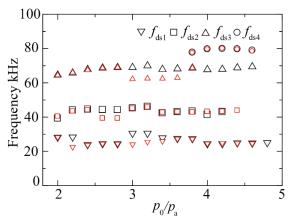


Fig. 5 Relation between frequency and pressure ratio (16 mm)

図 5 では黒枠のマークが 30°, 赤枠のマークが 60° での 圧力比と周波数の関係を表している.

16 mm ノズルでも周波数の上昇や減少は見られなかったが、角度が 60° の場合、卓越周波数付近に別の卓越周波数が発生し、その周波数がより高い音圧を発生させるため、角度によって卓越周波数が変化する結果となった.

4. 結論

- 1. 音響解析結果より、卓越周波数の変化は見られなかったが、音圧は圧力比によって変化することを確認した.
- 2. 角度の変化に関わらず、スクリーチ周波数は概ね一致していることを示した.
- 3. 16 mm ノズルの音圧は 12 mm ノズルの音圧と比べて低い傾向を示した.
- 4. 12 mm ノズルと 16 mm ノズルでは卓越周波数の位置が変化し、圧力比によっては卓越周波数の付近に別の卓越周波数を確認した.

5. 参考文献

- 小澤雄太,野々村拓,浅井圭介,"超音速噴流の乱流構造と発生する音響波の可視化",可視化情報学会誌, Vol.39, No.155, (2019), pp.137-142.
- 玉井弘二, 荒谷眞一, 小島英則, 高山和喜, "2.0mm 厚風冷強化ガラスに関する実験", Journalofthe Ceramic Society of Japan, Vol.110, No.4, (2002), pp.229-303.
- 3. 中野政身, 田島清, "高圧空気弁の騒音・振動の発生に関する空気力学的研究:第3報, 円筒形弁室で閉ざされた 円すい形弁における内部振動流と騒音・振動", 日本機 械学会論文集 B編, 49巻, 444号, (2004), pp.1658-1667.