円形急拡大部へ噴出する超音速放射状流れにおける履歴現象について

On hysteresis of supersonic radial jets discharged between two circular plates with abrupt area enlargement

○中村 一真 (東電大・院)　　遠藤 正樹 (東電大)　　榊原 洋子 (東電大)
Kazuma NAKAMURA, Tokyo Denki University, Ishizaka Hatoyama-machi, hiki-gun, Saitama 350-0394
Masaki ENDO, Tokyo Denki University, Ishizaka Hatoyama-machi, hiki-gun, Saitama 350-0394
Youko SAKAKIBARA, Tokyo Denki University, Ishizaka Hatoyama-machi, hiki-gun, Saitama 350-0394

1.　序論

超音速噴流は，流速が音速を超えて噴出する噴流のことである．超音速噴流の一種である不足膨張噴流は，ノズルリップからの膨張波が噴流境界で反射し，圧縮領域と膨張領域が周期的に形成される非一様な樽型のセル構造を持つ．このような流れ場は，高圧産業設備で生じやすい．高圧産業設備において，減圧弁の隙間から排出される噴流や断面が急拡大するダクトへ流入する噴流は，不足膨張噴流となる場合がある．これらの設備では噴流により圧力振動が発生し，騒音源となることがある(1).

本研究では放射状に広がる不足膨張噴流に着目する．減圧弁やダクトでは，噴流は壁面に囲まれた空間に噴出するため，容器内の流れ場を急拡大部に噴出する噴流でモデル化した．シャドウグラフ法を用いて流れ場を可視化し，流れ場からの放射音を計測することで，噴流構造や噴流の振動状態を調べることを目的とする．

2.　実験装置

本研究では，2 つの円管を隙間を設けて向かい合わせ，両端から圧縮空気を流すことで隙間から放射状の噴流が噴出する実験装置を用いた．この 2 つの円管で構成されたノズルをラジアルノズルと呼ぶ．本研究ではラジアルノズルの管の外径を 12 mm として実験を行った．

図 1 に本研究に用いた供試部の概略図を示す．本研究では，急拡大部の流れ場を再現するために，直径 80 mm の壁面を有する厚さ 10 mm のアクリル製の板 2 枚を隙間 4 mm を設けて噴流軸上に取り付けた．供試部の幅はスペーサーで固定されており，スペーサーの厚さを変えることで，任意の幅に調整することが可能である．

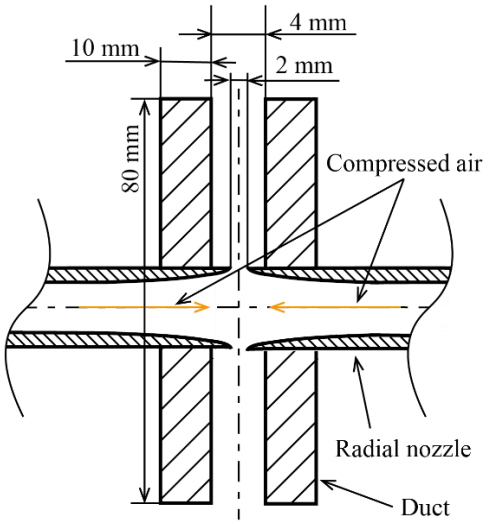


Fig.1 Radial nozzle with circular duct

3.　実験方法

3.1.　光学的可視化

圧縮性流れでは密度変化が存在するため，流れ場で密度勾配のある部分を通過する光は，プリズムを通過する場合と同様に屈折する．この性質を利用し，光線が屈折することで，明暗模様の可視化を可能にする方法としてシャドウグラフ法がある．本研究では可視化方法としてシャドウグラフ法を用いた．図 2 に示すように光源から発せられた光はコンデンサレンズを通過し，集光されピンホールを通過して点光源となる．その後光源側のコリメータレンズを通過し平行光線となる．平行光線は流れ場を通過したのちカメラ側のコリメータレンズを通過し，集光された光をカメラで撮影する．

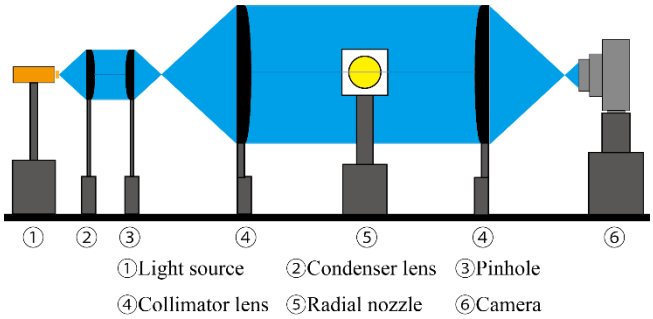


Fig.2 Side visualization device

3.2.　音響測定

本研究に用いた音響測定装置の概略を図 3 に示す．マイクロフォンをノズル出口より半径 L = 750 mm 離し噴流軸に対して角度θ = 30°に配置した．

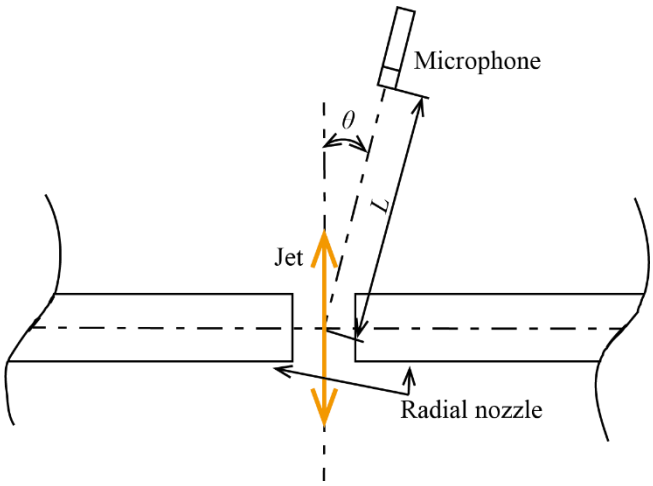


Fig3. Sound measurement

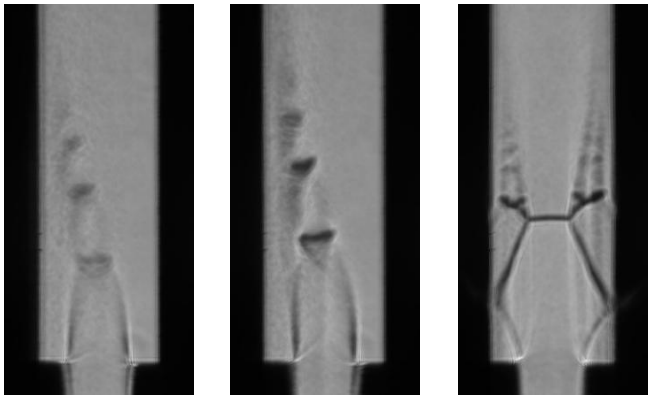
4.　実験結果

実験条件はタンク内のよどみ点圧力をp_0，大気圧をp_aとし，圧力比p_0/p_a = 2.0 から 4.8 まで 0.2 刻みで変化させ，上昇過程と減少過程におけるシャドウグラフ法による可視化と，音響計測を行った．

4.1.　可視化結果

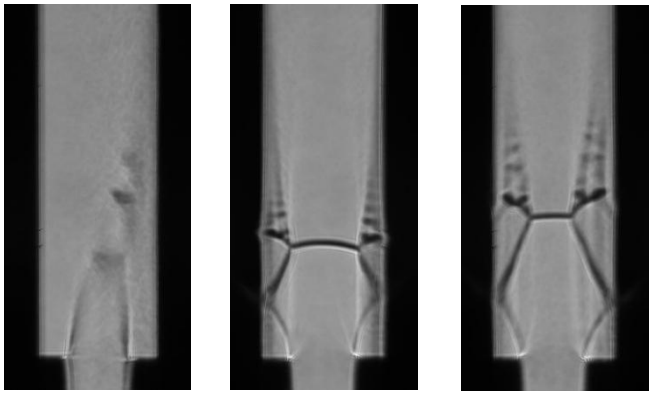
シャドウグラフ法を用いて各圧力比で噴流軸に対して側面からの可視化写真を 35 枚撮影した．撮影した写真は各圧力比ごとにグレースケール化したのちに平均化した．上昇過程の平均化写真の例を図 4 に，減少過程の平均化写真の例を図 5 に示す．

図 4 より，上昇過程において圧力比が上昇すると不足膨張噴流が支配的な流れ場から垂直衝撃波が支配的な流れ場に遷移することが確認できる．図 5 より減少過程においては圧力比が減少していくにつれて流れ場の規模は次第に小さくなるが，上昇過程と同様の圧力比まで減少しても垂直衝撃波が支配的な流れ場を維持する履歴現象が確認できる．また，上昇過程と減少過程での圧力比p_0/p_a =2.8 のときを比較すると，不足膨張噴流の下流が付着する面が異なることから，不足膨張噴流が支配的な流れ場は不安定であることがわかる．



(a) p_0/p_a = 2.8　(b) p_0/p_a = 3.4　(c) p_0/p_a = 4.0

Fig.4 Increasing process



(a) p_0/p_a = 2.8　(b) p_0/p_a = 3.4　(c) p_0/p_a = 4.0

Fig.5 Decreasing process

4.2.　音響測定結果

各圧力比において流れ場からの放射音を 35 回測定し，得られた時系列データを周波数解析し平均化した．マイクロフォンをノズル出口より角度θ = 30°に配置した際の音響計測結果として，圧力比p_0/p_a = 2.8 の場合を図 6 に示し，圧力比p_0/p_a = 3.4 の場合を図 7 に示す．

図 6 より，15 kHz 付近で高い音圧を示すピークが確認できる．これは，図 4 に見られるように，圧力比p_0/p_a = 2.8 では不足膨張噴流が支配的な流れ場であるため，不足膨張噴流による自励振動が要因であると考えられる．さらに高い圧力比での解析結果を図 7 に示す．圧力比p_0/p_a =3.4 における上昇過程と減少過程を比較すると減少過程の音圧が著しく低下していることが確認できる．これは，図 5 に見られるように，圧力比p_0/p_a = 3.4 における減少過程では，垂直衝撃波が支配的な流れ場となることで衝撃波の下流が亜音速になることで音圧が小さくなることが主要因であると考えられる．

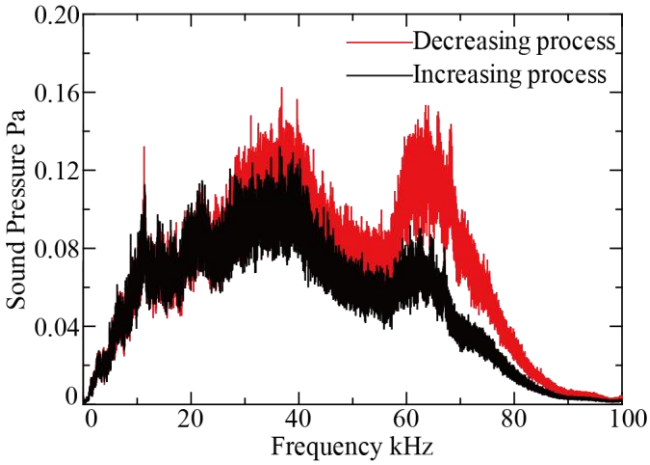


Fig.6 Dominant frequency at p_0/p_a = 2.8

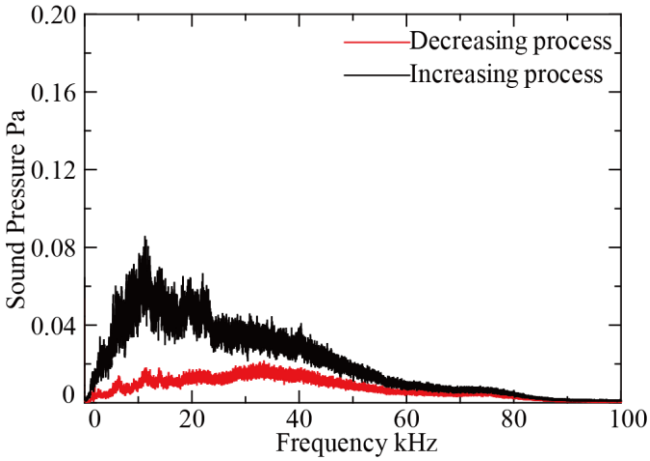


Fig.7 Dominant frequency at p_0/p_a = 3.4

5.　結論

(1)　可視化結果より，圧力比の上昇過程と減少過程で同じ圧力比でも流れ場のパターンが異なる履歴現象が存在することを確認した．

(2)　音響測定結果より，不足膨張噴流が支配的な流れ場では 15 kHz 付近で高い音圧を示すピークが確認できた．また垂直衝撃波が支配的な流れ場では衝撃波の下流が亜音速になることで音圧が著しく低下すると考えられる．

6.　参考文献

(1)　Krystyna J. Witozak, “Frow patterns and noise of a chocked gas jet expanding into a duct”, Archives of Acoustics, Vol.1,3, (1976), pp. 181-200.