

# 放射状不足膨張噴流の放射音に関する研究

## Sound Radiation from Underexpanded Radial Jet

○前田 和大 (東電大・院) 大川 達也 (東電大・院) 榎原 洋子 (東電大) 遠藤 正樹 (東電大)  
Kazuhiro MAEDA, Tokyo Denki University, Ishizaka, Hatoyama-machi, Hiki-gun, Saitama 350-0394  
Tatsuya OHKAWA, Tokyo Denki University, Ishizaka, Hatoyama-machi, Hiki-gun, Saitama 350-0394  
Yoko SAKAKIBARA, Tokyo Denki University, Ishizaka, Hatoyama-machi, Hiki-gun, Saitama 350-0394  
Masaki ENDO, Tokyo Denki University, Ishizaka, Hatoyama-machi, Hiki-gun, Saitama 350-0394

### 1. 序論

先細ノズルから臨界圧力比(空気の場合, 1.893)よりも大きな圧力比で大気中に空気を噴出させたとき, 樽型の連なるセル構造を形成する不足膨張噴流が得られる. この不足膨張噴流は膨張波, 圧縮波および衝撃波が複雑に干渉しあう超音速噴流の一種であり, 非一様な流れとなる<sup>(1)</sup>. ロケットエンジンの排気流も超音速噴流であり, 低速な流体とジェット噴流が混合することで非常に強い音響波を発生させる. この音響波はロケットに搭載された人工衛星を加振させ, 機能喪失の原因となり, この対策にコストと時間が費やされる. そのため, 超音速噴流から発生する音響波の正確な予測と低減は, 航空宇宙開発のコスト削減, 国際競争力向上の観点から非常に重要な課題であり, 実験と数値解析の両面から, 数多くの研究が行われている<sup>(2)</sup>.

また, 超音速噴流はレーザー加工時に利用されており, ドロスの付着を防ぐ役割を果たすアシストガスとして用いられる. 板厚が増加すると溝下部で逃す流速が減少し, ドロス排出が困難となり切断品質に大きな影響を与える. したがって, アシストガスの流れを把握することは非常に重要である<sup>(3)(4)</sup>.

さらに, 不足膨張噴流は内燃機関の吸排気バルブや配管内の減圧弁近傍で発生することもあり, その流れは, 放射状の広がりを見せる<sup>(5)</sup>. 管路要素内の通路の部分では, 気流は音速に達し, その下流で膨張して部分的に超音速となる. この領域では衝撃波が発生し, 弁プラグの振動が誘起される. また, 主流と周囲気体の混合過程で乱流渦が発生し, 騒音・振動による周辺の環境悪化や破損などが懸念されている<sup>(6)</sup>.

しかしながら, 放射状に噴出する不足膨張噴流に着目した研究は少なく不明瞭な点が多い. そこで, 本研究では放射状不足膨張噴流を対象とした数値解析を行い, 放射状不足膨張噴流の噴流構造や放射音について解明することを目的としている.

### 2. 計算モデルおよび数値解析法

放射状不足膨張噴流は, 図 1 のように向かい合っている 2 本のチューブの間の小さな隙間から音速で放射状に噴出し, 膨張と圧縮を繰り返す噴流である. そうした放射状不足膨張噴流を解析するために本研究で用いた計算モデルを図 2 に示す. ノズル中心軸 ( $x$  軸) に対して軸対称, スリットノズル中心面 ( $y$  軸) に対して対称な流れ場を仮定し, 破線で囲われた部分を計算領域としている. ノズル出口幅を  $b$  とし, 一様な大きさの計算格子を  $x/b = 10.0$  までの領域に 400 個,  $y/b = 12.0$  までの領域に 480 個とり,  $x/b = 10.0$  からは 250 個の格子を 1.013 倍ずつ拡大し,  $y$  軸方向に関しては  $y/b = 12.0$  から 370 個の格子を 1.013 倍ずつ拡大した. したがって, 計算領域は,  $x$  軸方向は  $x/b = 56.6$ ,  $y$  軸

方向は  $y/b = 242.9$  までの範囲を計算の対象としている.

本研究では, ノズル厚さ  $t/b = 0.5$  とし, ノズル外径  $D/b = 6.0, 8.0, 10.0$  の 3 つの条件でノズル圧力比  $p_0/p_a$  ( $p_0$ : 高压側よどみ点圧力,  $p_a$ : 大気圧) を 3.0 から 5.0 まで 0.2 刻みで値を変えながら解析を行った. 基礎式は, 軸対称オイラー方程式を使用し, 時間および空間ともに二次精度を有する対称型 TVD (Total Variation Diminishing) 法<sup>(7)</sup>を適用した.

### 3. 結果および考察

それぞれの  $D/b$  において  $p_0/p_a$  を変化させたときの流れ場に対して,  $x/D = 0.0, y/D = 12.0$  の点で圧力の変動を記

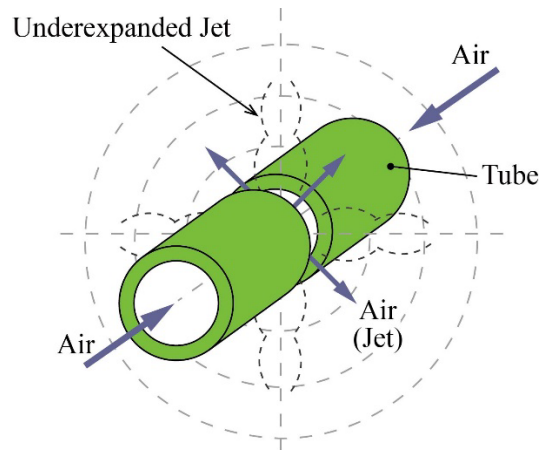


Figure 1 Underexpanded radial jet

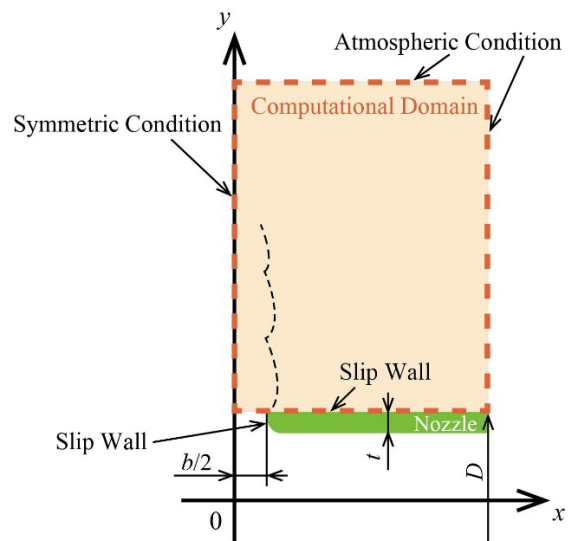


Figure 2 Computational model

録した。それらを周波数解析した結果、現れた最も支配的な周波数をプロットしたものを図3に示す。いずれの $D/b$ においても $p_0/p_a$ が大きくなると周波数が減少していく傾向が見られた。しかしながら、 $D/b = 6.0$ では、 $p_0/p_a = 4.6$ と $4.8$ の間で、 $D/b = 8.0, 10.0$ では $p_0/p_a = 4.8$ と $5.0$ の間で周波数が上にジャンプして高くなり、その後再び減少していく。全体として $p_0/p_a$ を増加させていくと周波数が減少傾向にあるのは、 $p_0/p_a$ の増加に伴いセルの大きさもまた増大していくことが関係していると考えられる。

図4のAに $D/b = 10.0$ ,  $p_0/p_a = 4.6$ , 図4のBに $p_0/p_a = 4.8$ の場合のノズル出口付近の流れ場の等密度線図を示す。セル構造は第3セルまで確認でき、下流に進むにつれセルの長さが短くなっている。また、第3セルよりも下流では渦が支配的な流れ場となる。そして噴流の周囲には、第3セル付近から上流と下流に伝播する波が発生している様子が見られる。周波数のジャンプ前後であるAとBを比較すると、上流に伝播する波の指向性が変化し、よりノズル出口から離れた方向に波が伝播することが分かる。

図5は $p_0/p_a$ を変えたときの $x/b = 10.0$ ,  $y/D = 5.5$ の点における圧力変動の最も支配的な周波数の振幅を示している。この点は上流に伝播する波の中に位置しており、図3と対応させて見ると周波数がジャンプする位置、 $D/b = 6.0$ では、 $p_0/p_a = 4.6$ ,  $D/b = 8.0, 10.0$ では $p_0/p_a = 4.8$ において振幅もまた急激に増大していることが分かる。図4で見られるように、周波数のジャンプ後には、上流に伝播する波が $x$ 方向に広がる。したがって図5の圧力の記録位置はAよりもBの方が噴流寄りでの振幅を捉えていることとなる。そしてそれは、周波数のジャンプ前後で上流に伝播する波の指向性が大きく変化したことを表している。

上流に伝播する波は、フィードバック現象に大きく関与しており、噴流からの放出音への影響も大きいと考えられる。すなわち、本研究で解明された周波数のジャンプ前後での上流に伝播する波の指向性の変化は、放射音の変化を生じさせる大きな要因の一つであると考えられる。

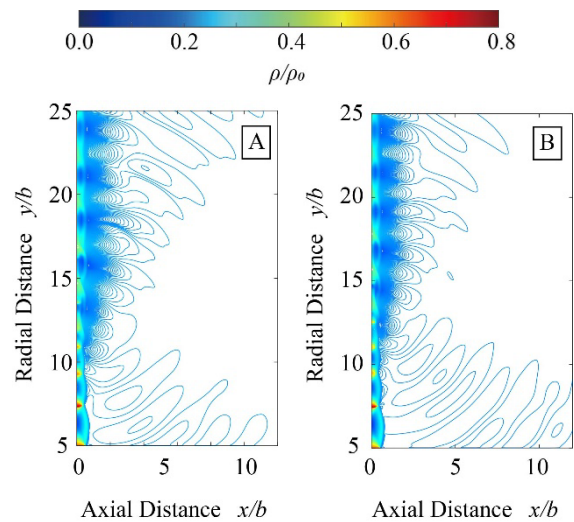


Figure 4 Density contours

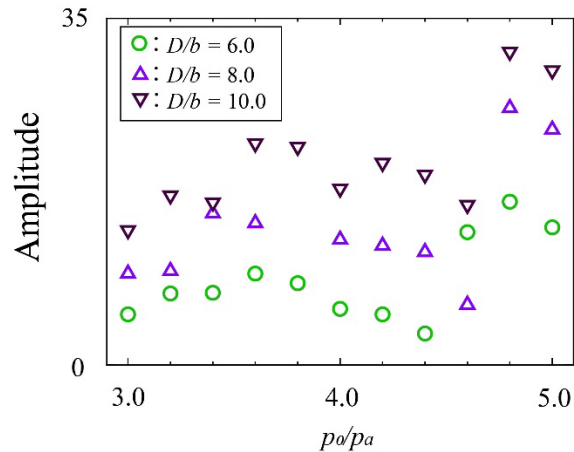


Figure 5 Amplitude relationship

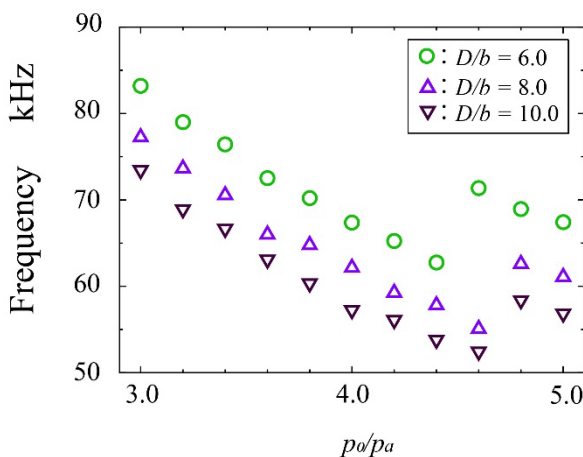


Figure 3 Frequency relationship

#### 4. 結論

放射状に噴出する不足膨張噴流の数値解析を行った結果以下の結論を得た。

1. いずれの $D/b$ においても、 $p_0/p_a$ を増加させていくと周波数のジャンプが現れる。
2. 周波数がジャンプする前後の圧力比において上流に伝播する波の指向性が大きく変化する。

#### 参考文献

- (1) 田村聡, 岩本順二郎, “不足膨張噴流および衝突噴流から発生する騒音について”, 日本機械学会論文集 (B 編), Vol. 60, No. 579, (1994), pp. 3873-3879.
- (2) 小澤雄太, 野々村拓, 浅井啓介, “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.
- (3) 荒谷真一, 小島英則, 高山和喜, “熱強化ガラス製作用ノズルからの衝撃波発生と自由噴流に関する研究”, 日本機械学会論文集 (B 編), Vol. 60, No. 590, (1995), pp. 3706-3711.
- (4) 金明, 渡辺武弘, 斉藤健介, “厚板のレーザー切断における圧縮性流体の数値解析”, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2007), pp. 739-740.
- (5) 金岡優, 古藤悟, “CO2 レーザーの切断品質とアシストガスに関する研究”, 日本機械学会論文集 (B 編), Vol. 59, No. 562, (1993), pp. 1952-1959.
- (6) 川崎公一, 遠藤正樹, 鈴木宏昌, 榎原洋子, “不足膨張状態の放射状噴流と矩形噴流における構造と放射音”, 日本機械学会論文集, Vol. 84, No. 866, (2018), pp. 1-15.
- (7) Yee. H. C. , “High-Resolution Shock-Capturing Schemes for Inviscid and Viscous Hypersonic Flows”, Journal of Sound and Vibration, Vol. 121, No. 1(1988), pp. 135-147.