

ノズルリップ形状の平板衝突不足膨張噴流への影響

Effect of Nozzle Lip Shape on Underexpanded Jet Impinging on Flat Plate

○鈴木 航(東電大・院) 榊原 洋子(東電大) 遠藤 正樹(東電大) 鈴木 宏昌(産技高専)
 Kou SUZUKI, 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
 Hiromasa SUZUKI, Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology, 1-10-40 Higashi-Ohi, Shinagawa-ku, Tokyo, 140-0011

1. 序論

超音速噴流とは音速よりも速い速度で噴出される噴流のことであり、レーザー加工時に排出される溶融物を除去するアシストガスや熱強化ガラスの冷却噴流などに用いられている⁽¹⁾。しかしながら、超音速噴流が物体に衝突するとき、スクリーチと呼ばれる騒音や振動などが発生し、その結果、製品の品質や作業環境の悪化が問題となっている。そのため超音速噴流に対し様々な研究が行われてきた⁽²⁾。平板に衝突する音速噴流の振動に関する研究や、自由噴流を用いてノズルリップの厚さを変える研究などが行われており、ノズルリップの厚さはスクリーチの発生に影響を与えることが報告されている。しかしながら、平板衝突噴流によるノズルリップの厚さの研究は例が少ない。

本研究では、平板に衝突する超音速噴流の流れ場において、ノズルリップの形状により、噴流構造および噴流の振動が流れ場に対してどのような影響をもたらすのかを数値解析を用いて明らかにすることを目的としている。

本稿では、ノズルリップの厚さが平板衝突不足膨張噴流の流れ場にどのような影響を与えるかを調査した。

2. 計算モデルおよび数値解析法

図 1 に本研究で用いた計算モデルを示す。図の左側に設置されたノズル出口直径 D の円形先細ノズルを通して大気中に噴流が噴出される。その後、図の右側に設置した平板に衝突し、平板壁面に沿って流れていく。図に示すように、噴流中心軸方向を x 軸、それに対し垂直方向を y 軸とし、噴流中心軸より上側の点線で囲まれた領域を計算領域とした。

ノズル圧力比 p_0/p_a (p_0 : 高圧側よどみ点圧力, p_a : 大気圧) を $p_0/p_a = 3.0$ に固定し、ノズル平板間距離を $L/D = 1.0$ から 4.0 の範囲で 0.5 ずつ変えて平板に衝突する流れ場の解析を行った。また、ノズルリップの長さは $L_n/D = 0.5$ で固定し、リップ厚さ $T_n/D = 0.1$ と 90.0 の 2 種類のノズルに対して計算を行った。

基礎式に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⁽³⁾を適用する。

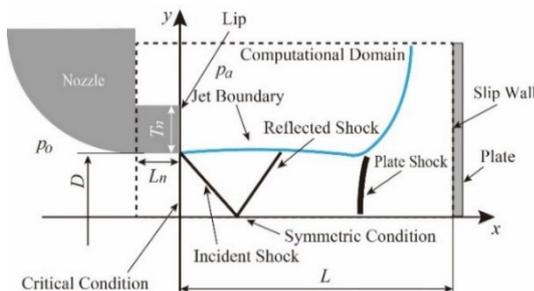


Fig. 1 Computational Model

3. 結果および考察

3.1. 流れ場の変化

図 2 に $L/D = 2.5$, $T_n/D = 0.1$ における瞬間の等密度線図を示す。図の左側のノズルから噴出された噴流は図の右側にある平板に衝突し、樽型のセル構造を形成している。噴流は平板に衝突後、平板に沿って噴流中心軸から遠ざかるように移動している。また、 $x/D = 2.0$ 付近にプレート衝撃波が発生していることがわかり、その上流部分では、セル構造を形成している入射衝撃波や反射衝撃波も見られる。

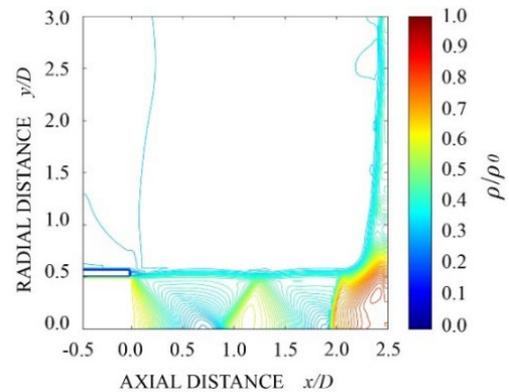


Fig. 2 Density Contours ($L/D = 2.5$, $T_n/D = 0.1$)

図 3 に $L/D = 3.5$, $T_n/D = 0.1$ における瞬間の等密度線図を示す。図 2 と比較して、主噴流の噴流境界で発生した渦によってセル構造は第二セル付近で崩壊し、プレート衝撃波の形状も変化していることが分かる。また、それらの渦はプレート衝撃波付近では大きく成長し、壁面噴流とともに中心軸から遠ざかるように図の上側に向かって移動している。また、噴流の周囲には、プレート衝撃波付近から放射状に密度波が大気中に伝播している様子が確認できる。

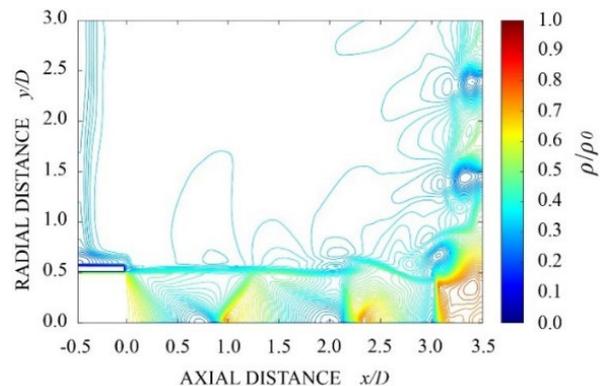


Fig. 3 Density Contours ($L/D = 3.5$, $T_n/D = 0.1$)

3.2. ノズルリップの影響

図4に $L/D = 3.0$, $T_n/D = 0.1$ における瞬間の等密度線図を、図5に同じ L/D でノズルリップ厚さ $T_n/D = 90.0$ の場合の結果を示す。リップ厚さが小さい場合の図4においては、図3と同様に主噴流のセル構造が崩壊し、噴流の周囲には多数の渦が発生しており、噴流が激しく振動していることが分かる。

一方、リップ厚さの大きな図5においては、流れ場が激しく振動することはない、図2と同様に主噴流はセル構造を維持したまま平板に衝突している。さらに計算を行った結果、このリップ厚さの場合に噴流が激しく振動し始めるのは $L/D = 3.5$ よりも大きなノズル平板間距離の時であることが確認された。

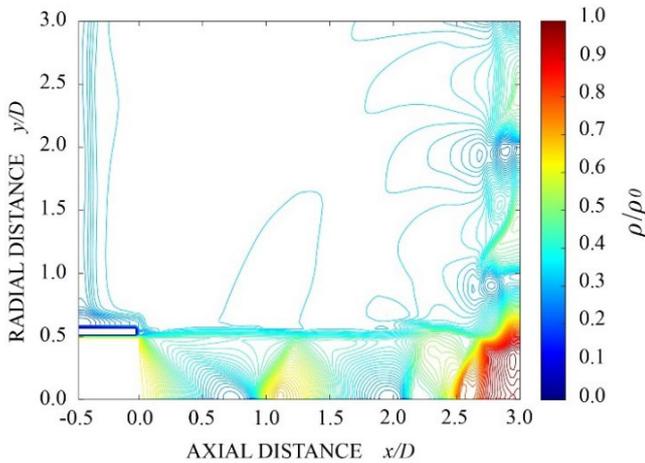


Fig. 4 Density Contours ($L/D = 3.0$, $T_n/D = 0.1$)

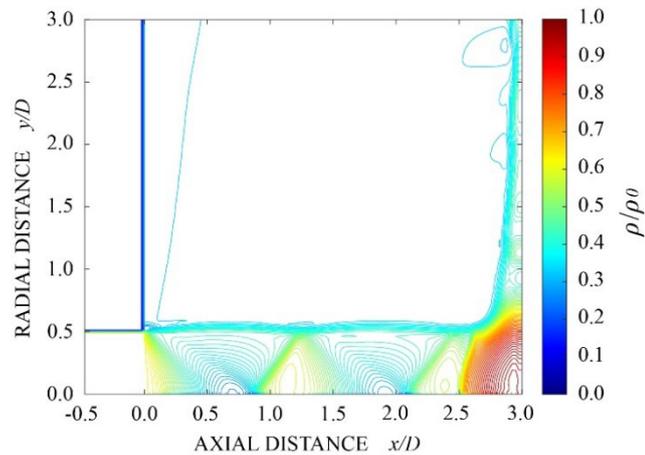


Fig. 5 Density Contours ($L/D = 3.0$, $T_n/D = 90.0$)

これらの結果から、ノズルリップ厚さによって、流れ場が激しく振動を始めるノズル平板間距離が変化することがわかる。

図6にリップ厚さに関わらず激しい振動をしていない状態である $L/D = 2.5$ において、各リップ厚さにおける平板上の圧力分布を示す。壁面噴流と共に移動する渦により、いずれのリップ厚さの結果においても $y/D = 3.5$ 付近の領域で圧力の変動が見られる。変動の幅に着目すると、 $T_n/D = 90.0$ のときに比べ、 $T_n/D = 0.1$ のときのほうが圧力の変動幅が大きいことがわかる。これは主噴流からの渦の成長が促進されたためであると考えられる。

図4と図5の比較から分かるように、ノズルリップが小さいときリップ付近および周囲のノズル壁面の密度は小さく、したがって圧力もまた低くなっている。それにより噴流周囲の流れは影響を受ける。またノズルリップ近傍では上流からノズル出口へ向かう流れが発生し、主噴流の噴流境界におけるじょう乱の発生を促進する。それによって噴流が激しく振動するものと考えられる。

したがって、ノズルリップの厚さによって、流れ場が激しく振動を始めるノズル平板間距離が変化するのは、ノズル壁面の圧力の低下とそれによって上流に誘起されたノズル出口に向かう流れの発生に起因していると考えられる。

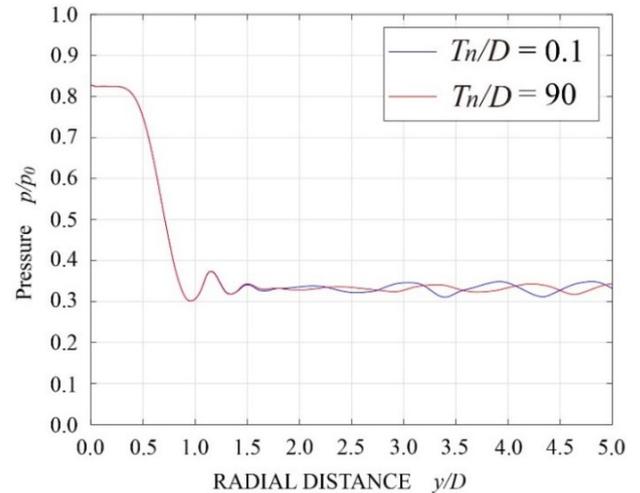


Fig. 6 Pressure Distribution on Flat Plate ($L/D = 2.5$)

4. 結論

異なるリップ厚さのノズルから噴出して平板に衝突する噴流の流れ場の数値解析により、噴流が激しく振動を始めるノズル平板間距離がリップ厚さに依存することが分かった。これはリップ厚さが薄いと、ノズル出口面上流から出口に向かって流れが発生し、主噴流の噴流境界におけるじょう乱の発生を促進するためである。

参考文献

- (1) 宇野義幸, 岡本康寛, 廣瀬和典, 川口茂孝, 窪田真一郎, 三柳直毅, “YAG レーザを用いた精密切断加工におけるアシストガスの供給法に関する研究”, 精密工学会誌論文集, (1999), Vol.65, No.10, pp.1471-1475.
- (2) 安信強, 樫村秀男, 小林稔道, “傾斜板に衝突する超音速噴流により形成される波動形態”, 可視化情報学会論文誌, (1997), Vol.17, No.2, pp.87-90.
- (3) Yee, H. C. “High-Resolution Shock-Capturing Schemes for Inviscid and Viscous Hypersonic Flows”, Journal of Computational Physics, 88(1990), pp. 31-60.
- (4) 鈴木翔平, “平板に衝突する超音速噴流における噴流構造と振動に関する研究”, 東京電機大学令和3年度修士論文, (2021)
- (5) 中村友行, “不足膨張衝突噴流に関する実験的研究”, 東京電機大学博士学位論文, (1997)