

平板に衝突する不足膨張噴流の密度勾配の計測

Measurement of density gradient of underexpanded jet impinging on flat plate

○佐藤 聖渚(東電大) 新井 悠太(東電大) 遠藤 正樹(東電大) 榊原 洋子(東電大) 鈴木 宏昌(産技高専)
Sena SATO, Yuta ARAI, Masaki ENDO, Youko SAKAIBARA,

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

不足膨張噴流は超音速噴流の一つの形態である。ノズル前後の圧力比が臨界値以上の空気を先細ノズルから大気中に噴出させることにより、ノズル出口面より不足膨張噴流という特異な流れ場が形成される。

噴流内部では、ノズル出口から膨張波が発生し、噴流境界で圧縮波として反射される。そのため樽型のセル構造となり、その下流に同じ形状のセルが続く。この噴流は多岐にわたり利用されており、代表例としてレーザ加工時のアシストガス⁽¹⁾などが挙げられる。しかし、不足膨張噴流を被衝突物へ衝突させると被衝突物の近傍にはプレート衝撃波と呼ばれる衝撃波が生じ、激しい振動を伴うことから被衝突物上のよどみ点圧力に影響を与える。また、流れ場からスクリーチ音と呼ばれる高周波音が放射されることで、噴流の発生装置などの疲労破壊を引き起こす原因となる。また、加工精度や加工効率の悪化も懸念されている⁽²⁾。

こうした背景から、本研究では噴流構造を詳細に解明するために、可視化法の一つである BOS 法を用いて、不足膨張衝突噴流の可視化を行いシュリーレン画像と比較を行った。また、密度勾配の計測を試みた。

2. 実験方法

本実験では、ノズル平板間距離 l 、ノズル出口直径 D 、ノズル上流のよどみ点圧力 p_0 、大気圧 p_a と定義した。

2.1. シュリーレン法

図 1 にシュリーレン法の実験装置を示す。光源から発せられた光がコンデンサーレンズで集光し、ピンホールで点光源となる。その後、コリメータレンズによって光を平行にし、先細ノズルからの噴流を通過し、二つ目のコリメータレンズにより集光し、カメラの前にあるナイフエッジにより集光された光の一部が遮られる。その結果、密度分布の 1 階微分である密度勾配の可視化写真が得られる。カメラの焦点位置は流れ場の中心とする。

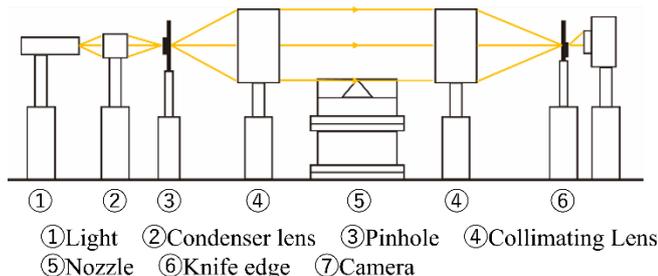


Fig.1 Schlieren system

2.2. BOS 法

図 2 に BOS 法の実験装置を示す。シュリーレン法と比較して、BOS 法は少ない光学系で可視化することができる。

背景にピントを合わせ、噴流以外の光軸系を前後に動かすことにより光源から噴流前後での密度勾配を計測する。

撮影は各 2 パターン行う。1 つは、測定部の密度が一様な、噴流が形成されていない状態で行う。この場合、元の背景と同様の写真が得られる。もう 1 つは、密度が一様でない、噴流がある状態で行う。この場合、噴流の密度変化により背景が歪んだ写真が得られる。

画像のゆがみ量は、流れ場の密度勾配に比例するため、この 2 パターンの写真に画像相関法を用いることで、シュリーレン法と同様な密度勾配に相当する濃淡の可視化写真が得られる。シュリーレン法が密度勾配を定性的に扱うのに対し、BOS 法は定量的に扱うことができる。

本研究では、平凸レンズを用いて背景の像を噴流近傍に結像させ、密度勾配の計測を試みた。ここで、背景の結像点とノズルまでの距離を L とする。

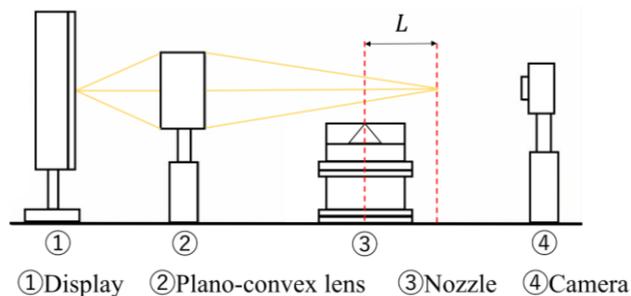


Fig.2 BOS system

3. 実験結果

3.1. シュリーレン法

図 3 にシュリーレン法による可視化結果を示す。 $l/D = 2.5$ 、 $p_0/p_a = 3.0$ の結果である。図は瞬間写真 50 枚を平均化した画像である。黒色の部分は膨張領域、白色の部分は圧縮領域を示す。このように明暗により、密度勾配は確認できる。

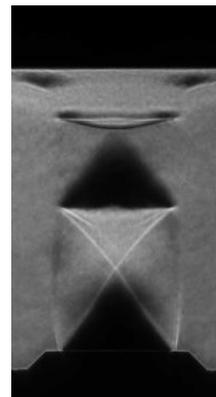


Fig.3 Schlieren image ($p_0/p_a = 3.0$, $l/D = 2.5$)

3.2. BOS 法

本実験では、 $l/D = 2.5$ 、 $p_0/p_a = 3.0$ 、 $L = 10$ mm から 100 mm まで 10 mm 刻みで実験を行った。背景の模様として噴流軸に対して垂直な横縞模様を採用し、縞の間隔は 1 ピクセル間隔でディスプレイに表示させた。図 4 に $L = +80$ 、 $+90$ 、 $+100$ mm での平均化画像を示す。ここで、平均化画像とは基準の画像から縞の移動量を得て、画像 50 枚を平均化した結果である。圧縮領域と膨張領域の存在が確認でき、 $L = +80$ mm と比較して、 $L = +100$ mm での可視化画像の方が圧縮膨張領域が鮮明に現れていることがわかる。縞の移動量は L に比例するため $L = +80$ mm では、縞の移動量が小さく不明瞭な画像となったと考えられる。

本研究では、噴流の密度勾配を計測するために次の式を使用した。

$$\theta = \int_0^D \frac{K}{n} \frac{d\rho}{dx} dy \cong KD \frac{d\rho}{dx} \quad (1)$$

ここで K はグラッドストーン・デール定数であり、 $K = 2.2596 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{kg}$ である⁶⁾。また θ は偏向角であり、 KD で除算することで密度勾配 $d\rho/dx$ を求める。図 5 に密度勾配を示す。図 5(a) は $L = +80$ mm、 -80 mm の 2 点での縞の移動量の差より算出した結果であり、図 5(b) は $L = +100$ mm、 -100 mm を用いた結果である。両者はよく一致しており、 L に関わらず、密度勾配を算出することができる。また、図 6 に軸対称の流れを仮定した数値計算結果より求めた密度勾配を示す。噴流の密度変化がノズル直径 $D = 10$ mm で生じていると仮定した場合の勾配であり、BOS 法の結果とよく一致している。よって、背景を平凸レンズを用いて噴流近傍に結像させる方法は密度勾配の計測に有用であると考えられる。しかしながら、数値解析ほど明瞭とは言えない。背景の縞の間隔をより狭くするなどの解像度の高い撮影を行うことにより、より明瞭な密度勾配の可視化が可能となると考えられる。

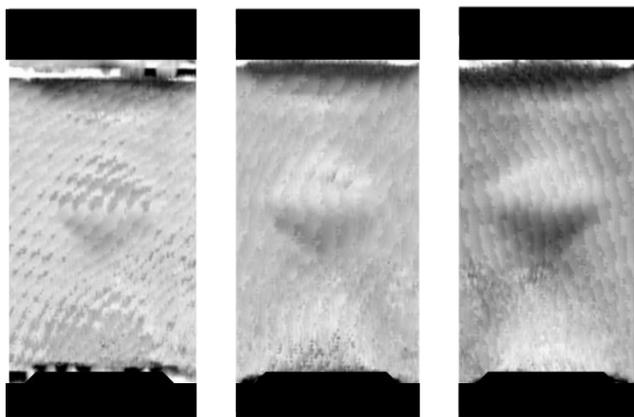
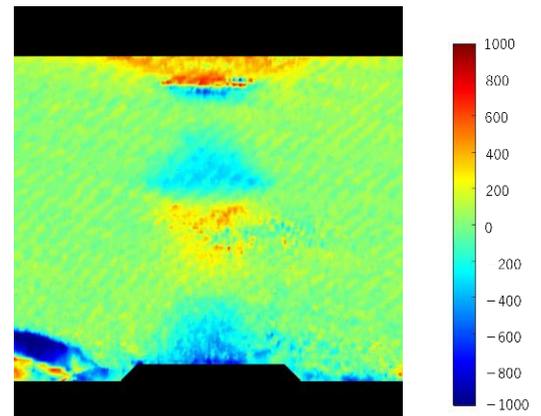


Fig.4 Average image

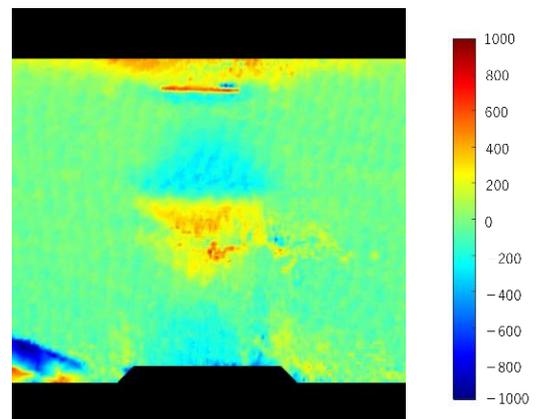
4. 結論

本研究では噴流構造を詳細に解明するために、可視化法の一つである BOS 法を用いて、不足膨張衝突噴流の可視化および密度勾配の計測を試みた。BOS 法では、分解能が低いもののシュリーレン法と同様に可視化画像を取得できた。縞の移動量の大きい画像の取得により、シュリーレン法と同等の可視化が可能であると考えられる。また、平凸

レンズを用いて噴流近傍に背景を結像させた。この画像を用いて密度勾配を算出したところ、結像点 L に関わらず密度勾配の結果を得ることができ、数値計算結果と良い一致を示した。よって、平凸レンズを用いた BOS 法は密度勾配の計測に有用である。



(a) $L = \pm 80$ mm



(b) $L = \pm 100$ mm

Fig.5 Density Gradient by BOS

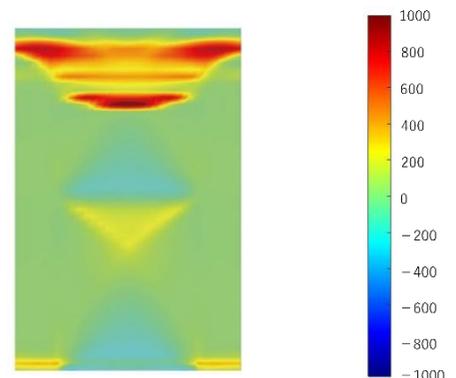


Fig.6 Density Gradients by Numerical Simulation

5. 参考文献

- (1) 金岡優, 古藤悟: CO₂ レーザ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 C 編, 59 巻, 562 号, pp. 1952-1959, 1993.
- (2) C.K.W.Tam: SUPERSONIC JET NOISE, Annu.Rev. Fluid Mech, vol. 27, pp. 17-43, 1995.
- (3) 遠藤正樹: シャドウグラフ法による超音速衝突噴流内に形成されるプレート衝撃波の可視化について, 数理科学会論文集, vol. 22, No. 1, pp. 9-13, Apr. 2021.