

# 円形急拡大部を有する超音速放射状噴流に関する研究

## Study on Supersonic Radial Jet with Circular Abrupt Enlargement Section

○峯田 一希(東電大) 松村 啓吾 (東電大) 遠藤 正樹 (東電大) 榊原 洋子 (東電大)  
Kazuki MINETA, Keigo MATSUMURA, Masaki ENDO, Yoko 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り、航空機の排気噴流などに見られる。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脹波が噴流境界で反射し、圧縮領域と膨脹領域が周期的に形成される構造を持つ。工業分野においては板材などの溶断に用いるレーザ加工時のアシストガスやガラスフィルムなどの熱強化ガラス製造時の高速冷却噴流として使用されている<sup>(1)(2)</sup>。また、石油化学プラントなどの高差圧弁下流配管の分岐部では、配管が振動し短時間で疲労破壊に至ることがある。この原因の一つに、配管内に形成される超音速流の振動による「流動励起振動」が指摘されている。圧力調整弁下流の断面積急拡大部を高温高压ガスが通過する際、噴流は超音速流れとなり、噴流と管との干渉により振動を引き起こす。この自励振動は大きな騒音を発生させるだけでなく、管自体を振動させ、配管系の疲労破壊の原因になりうる<sup>(3)(4)</sup>。

本研究では、圧力調整弁等から噴出される超音速噴流に着目する。この噴流は不足膨張状態であり放射状に広がるため、放射状不足膨張噴流と呼称する。弁内部の流れ場を急拡大部内に噴出する噴流でモデル化し、シャドウグラフ法を用いて流れ場を可視化することで、噴流構造や流れ場の基本的特性を調べることを目的とする。

### 2. 実験装置および方法

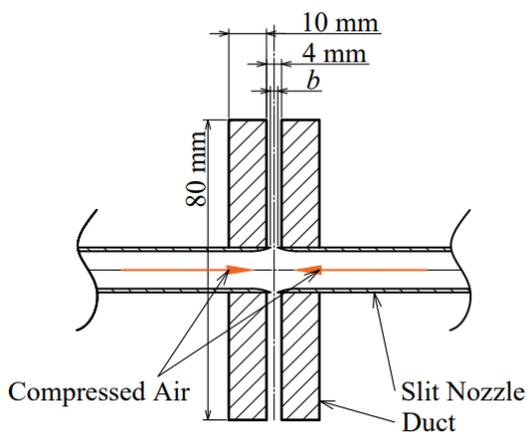


Fig. Slit nozzle with abrupt enlargement section

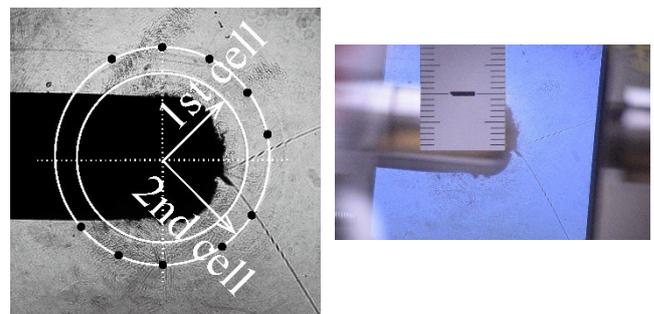
図 1 にスリットノズルの概略図を示す。2つの高压タンクに供給された空気は、それぞれのタンクに取り付けられた円管へ供給される。2つの円管は隙間  $b = 2 \text{ mm}$  を設け、向かい合って設置される。円管は、外径  $D = 12 \text{ mm}$ 、肉厚  $t = 1 \text{ mm}$  である。この2つの円管で構成されたノズルを本研究ではスリットノズルと呼称する。高压タンクから供給された空気は、スリットノズルより放射状に噴出する。ノズル

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・加工されている。本研究では、急拡大部内の流れ場を再現するために、直径  $80 \text{ mm}$ 、厚さ  $10 \text{ mm}$  のアクリル製の円板 2 枚を隙間  $4 \text{ mm}$  を設けて噴流軸上に取り付けた。供試部壁面と噴流との干渉を可視化する。

### 3. 正面可視化による衝撃波計測

衝撃波の位置と大きさを圧力比を変化させて検討する。本研究では、光の性質を利用して流れ場の密度変化を可視化するシャドウグラフ法を採用した。正面と側面の2方向から可視化実験を行った。正面からの可視化では、圧力比上昇過程および減少過程において各圧力比で瞬間写真 30 枚の撮影を行った。

図 2 に衝撃波リングの計測方法を示す。ノズル出口上部にスケールを当ててピントを合わせた写真から、 $10 \text{ mm}$  あたりのピクセル数を求めた。その値を用いて、可視化写真より衝撃波リングがノズル中心軸を中心とする真円であると仮定し、衝撃波リング上の任意の 10 点の位置の座標値を決定した。その後、10 点を通る円の方程式を最小二乗法により求め、リング半径から各衝撃波のノズルリップからの距離を算出した。衝撃波リングの位置  $l$  をノズル間隙  $b$  で除して無次元化した値  $l/b$  を正面からの可視化実験におけるパラメータと置いた。



(a) Shock ring

(b) Scale

Fig.2 Shock ring measurement

### 4. 垂直衝撃波の振動計測

側面からの可視化実験において、圧力比上昇過程、減少過程それぞれの瞬間写真 100 枚について、垂直衝撃波の位置を各圧力比で計測した。衝撃波の位置  $l$  をノズルの隙間  $b$  で除して無次元化した値  $l/b$  を側面からの可視化実験におけるパラメータと置いた。

### 5. 実験結果および考察

#### 5.1 正面可視化結果

図 3 に上昇過程における圧力比 3.2 および 4.8 における瞬間写真の一例を示す。圧力比 3.2 では不足膨張噴流が支

配的な流れパターンであり、セル節に相当する単一形状の衝撃波リングが見られる。一方、圧力比 4.8 では二重形状の衝撃波リングが見られることから、垂直衝撃波が支配的な流れパターンであると考えられる。

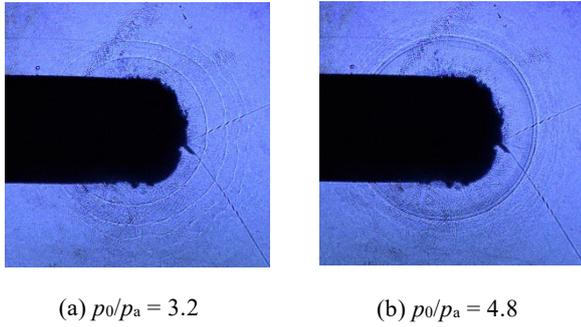


Fig.3 Shadowgraph for front view

図 4 に上昇過程および減少過程における各圧力比の衝撃波リングの位置を示す。縦軸が衝撃波の位置で横軸が圧力比である。上昇過程において、圧力比 3.2 から第 1 衝撃波リングと第 2 衝撃波リングが上流へと移動している。減少過程において、第 2 衝撃波リングは上流へと移動しているが、第 1 衝撃波リングの位置に顕著な変動はみられない。このことから、圧力比 3.2 において、不足膨張噴流が支配的な流れパターンから垂直衝撃波が支配的な流れパターンへと遷移したと考えられる。

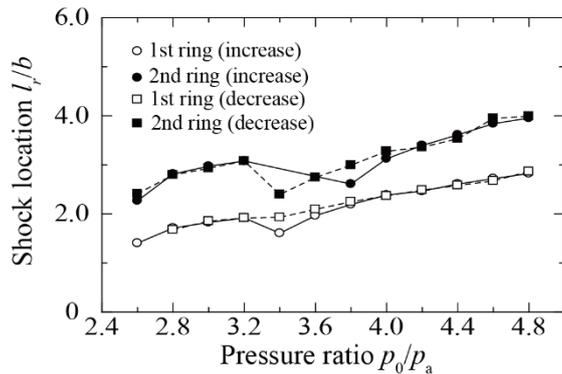


Fig.4 Shock location

### 5.2 振動計測結果

図 5 に側面からの可視化結果を示す。圧力比 4.8 における、撮影時間の異なる 2 枚の瞬間写真を示す。同じ圧力比においても垂直衝撃波の位置に変動があることがわかる。これは衝撃波上流と下流の圧力条件から決まる定位置の前後に振動すると考えられる。

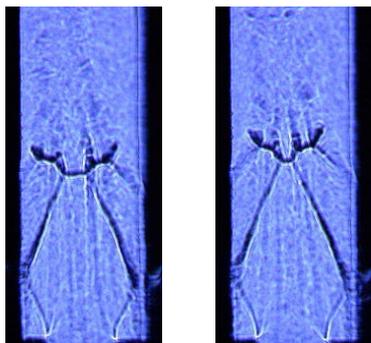
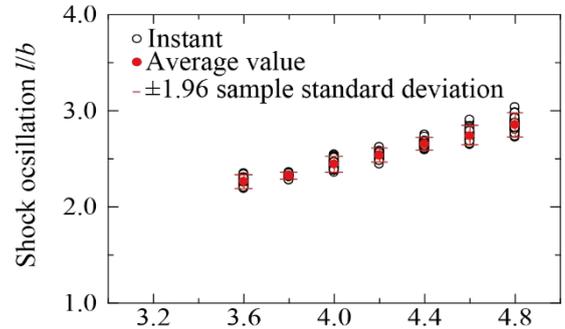
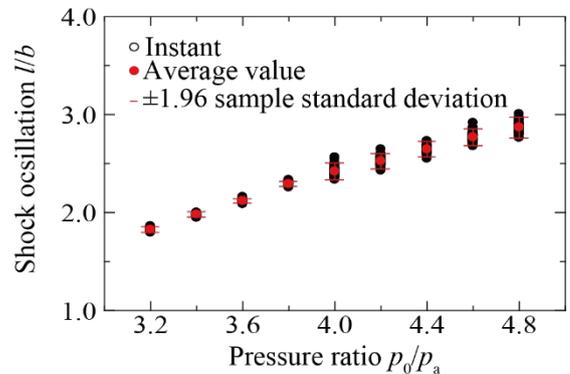


Fig.5 Instant view for side direction

図 6 に垂直衝撃波が確認できる圧力比において、瞬間写真 100 枚の垂直衝撃波の位置を計測し、不偏標準偏差との関係を示す。上昇過程では圧力比 3.6 以上で垂直衝撃波が確認できる。また、減少過程では圧力比 3.2 以上で垂直衝撃波が確認できる。圧力比が上昇するにつれて、振動幅が大きくなるのがわかる。



(a) Increasing process



(b) Decreasing process

Fig.6 Normal shock oscillation

### 6. 結論

- ・圧力比を上昇させていくと、衝撃波リングは単一形状から二重形状へと変化することが正面可視化からわかった。
- ・流れパターンが不足膨張噴流から垂直衝撃波へと遷移すると、衝撃波リングの位置は上流へと移動することがわかった。
- ・側面可視化における振動計測から、同じ圧力比においても垂直衝撃波の位置は上流下流へと振動することがわかった。
- ・圧力比が上昇するにつれて、垂直衝撃波の位置は下流へと移動し、振動幅が大きくなることがわかった。

### 7. 参考文献

- (1) 金岡優, 古澤悟, “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, (1993), pp.1952-1959.
- (2) 荒谷眞一, 小島英則, “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), 61 巻 590 号, (2002), pp.3706-3711.
- (3) 関根太一, 遠藤正樹, “超音速流により誘起される管の振動に関する研究”, 日本機械学会関東支部第 20 期総会講演会講演論文集, 20 巻, 2014.
- (4) 助田進, 岩本順二郎, “急拡大部下流における管内流れの振動現象に関する研究”, 日本機械学会論文集(B 編), 57 巻, 538 号, (1991), pp. 1989-1994.