

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：27101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05804

研究課題名(和文) 三次元超音速噴流の密度測定に対するレインボーシュリーレン断層撮影装置の開発研究

研究課題名(英文) Development of tomographic rainbow schlieren for density fields in three-dimensional supersonic jets

研究代表者

宮里 義昭 (Miyazato, Yoshiaki)

北九州市立大学・国際環境工学部・教授

研究者番号：30253537

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：レインボーシュリーレン偏向法が設計マッハ数1.5の超音速ノズルからの衝撃波を伴う自由噴流に適用された。実験では、出口が直径1mmあるいは10mmの軸対称超音速ノズルと出口が正方形断面で1mmあるいは10mmの矩形超音速ノズルを用いた。実験は、噴流内に衝撃波を伴う条件で行われた。また、実験で得られた密度場との相互比較のために、流れ場を微小変動理論と数値シミュレーションを用いて解析した。その結果、本研究で開発したレインボーシュリーレン装置は、衝撃波を伴う自由噴流の三次元密度場を得るのに非常に有効であることがわかった。

研究成果の概要(英文)：Rainbow schlieren deflectometry combined with the computed tomography have been applied for shock-containing free jets issued from supersonic nozzles with a design Mach number of 1.5 to obtain three-dimensional density fields in the jets with high spatial resolution and accuracy. Two types of nozzle configurations were tried in the present experiment: One is an axisymmetric supersonic nozzle in which the nozzle has 1 mm diameter or 10 mm diameter at the exit. The other is a square supersonic nozzle in which the nozzle has a cross-sectional area of 1 mm x 1 mm or 10 mm x 10 mm at the nozzle exit. Experiments have been performed for nozzle pressure ratios to produce shock-containing free jets. Also, jet density fields were solved using the vortex sheet theory and the RANS equations. As a result, it is shown that the rainbow schlieren deflectometry is a useful tool for studying the three-dimensional structure of shock containing free jets.

研究分野：高速気体力学

キーワード：シュリーレン法 密度計測 CT 衝撃波 超音速流れ

### 1. 研究開始当初の背景

超音速流れの計測は、ピトー管や熱線流速計等の接触測定法を用いて良く行われる。しかし、このような計測方法は流れ場を大きく乱す可能性があり、本来流れが持っている特性が変更されることが予想される。例えば、不足膨張噴流や過膨張噴流のように流れが衝撃波と膨張波を含む複雑な領域から成る場合、接触測定法は、実験値に顕著な測定誤差を生じさせる場合が多い。さらに、接触測定法は、一般に空間分解能が乏しく、測定は、1点1点不連続的に行われる。このようなことから、近年複雑な流れ場の構造を精度よく定量的に調べるための非接触測定法の必要性が要求されている。

従来から超音速流れへの光学計測として比較的良く用いられる測定法に、モノクロシュリーレン法とカラーシュリーレン法がある。両手法とも比較的簡単に光学系を組むことができるが、これらの方法で撮影された画像からベクトル量やスカラー量を得ることは非常に困難で、得られた画像データからはほとんどが流れの定性的な情報しか得られない。また、これらのシュリーレン法では、流れ場の奥行き情報が平均化され、二次元の情報しか得られない。したがって、これらの手法を三次元流れに適用すると、得られた情報にはおのずと誤差が含まれる。以上のような欠点を克服するため、シュリーレン光学系を用いた新しい定量的可視化法がいくつか開発されて利用されている。

田部井らは、正方形先細ノズルからの不足膨張音速噴流の密度場の三次元構造をモアレシュリーレン法<sup>①</sup>によって定量的に測定している。この方法は、マッハ・ツェンダー干渉法と比較して光学系が単純で、光軸調整が容易であるが、高価なレーザーを用いる必要がある。また、噴流中のマッハディスク直後の密度値の精度は定量的にかなり低い。シャープフォーカシングシュリーレン法<sup>②</sup>では、光軸方向に垂直な任意の断面に対する密度測定が可能であるが、空間分解能が悪く、得られた密度と真の値との誤差が非常に大きい。背景シュリーレン法<sup>③</sup>は、きわめて簡素な撮影系を用い、背景画像を利用して流れ場の三次元撮影を行うもので、適切な光源と背景画像、カメラがあれば計測を行うことができる。しかし、この手法の空間分解能と密度の計測値の精度は低いことが知られている。Kolheら<sup>④</sup>と宮里ら<sup>⑤</sup>はほぼ同時期にレインボーシュリーレン偏向法によって、軸対称超音速噴流の密度場の定量化を世界で初めて行った。本研究では、レインボーシュリーレン法とCBPアルゴリズムを用いたコンピュータグラフィの原理を用いて、矩形ノズルからの超音速噴流の三次元密度場の計測を行う。

### 2. 研究の目的

超音速噴流の構造を定量的に調べることは、学問的にも工学的にも非常に重要なため、これまで多くの実験的及び理論的研究が行われている。その結果、超音速噴流の圧力場についてはある程度明らかになっているが、密度場の詳細については不明な点が多い。近年、著者らは、光学系の設計製作が容易で高空間分解能かつ高精度で超音速噴流の密度場を得る測定法としてレインボーシュリーレン偏向法に注目しており、その軸対称超音速噴流への応用に対しては、いくつかの研究成果を得ている。本研究では、この計測法をさらに発展させるために、レインボーシュリーレン偏向法にコンピュータグラフィを組み合わせて、超音速噴流の三次元密度場の計測が可能全く新しい光学計測法(レインボーシュリーレン断層撮影法)を確立する。

### 3. 研究の方法

圧縮機によって高压タンクに蓄えられた乾燥空気は、図1に示す電磁弁を通過して、集合洞で一旦よどみ状態になった後、供試ノズルを通して大気に放出させる。光源からの光は、図1の左端に示すピンホールを通った後、コリメータレンズで平行光線となり、集光レンズ、レインボーフィルター、デジタルカメラに達する。本研究では、供試ノズルとして、出口断面が円形で直径が1mmと10mmの軸対称先細ノズルと設計マッハ数1.5の軸対称ラバルノズル、出口断面が正方形で一片の長さが1mmと10mmの正方形先細ノズルと設計マッハ数1.5の正方形ラバルノズルを用いた。

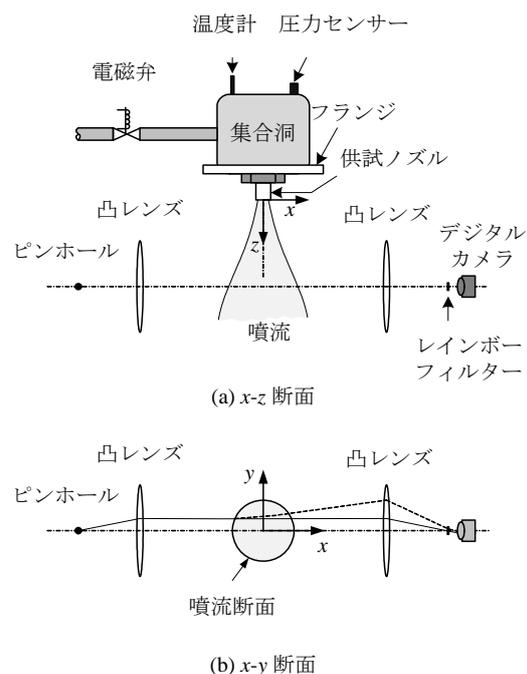


図1 実験装置の概要

次に、供試ノズルからの噴流構造を定量的に計測するために、シュリーレン光学系を固定した状態で、供試ノズルを $z$ 軸まわりに等間隔で回転させる。本実験では、供試ノズルをノズルの中心軸まわりに自動的に回転させるために、図2に示すように、ステッピングモーター、歯付ベルト、歯車①、歯車②から成る部品を集合洞のフランジに設置した。歯車②にねじ止めされた供試ノズルは、フランジに固定された押さえ板によって軸方向の移動が制限される。また、フランジと供試ノズルの間にゴムパッキン、供試ノズルと押さえ板の間にスラストワッシャーを設けることで集合洞からの高圧流れがノズルの外周を通して集合洞の外部に流出するのを防ぐことが可能である。

なお、実験との相互比較を行うために、汎用数値計算ソフトANSYS社のFluentを用いて対象とする流れ場の数値計算を行った。

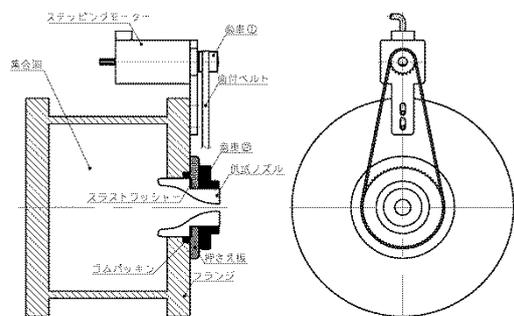


図2 供試ノズル回転装置

#### 4. 研究成果

本研究で得られた研究成果は以下の通りである。

- (1) 設計マッハ数が1.5でノズル出口が直径1 mmの円形断面の超音速ノズルからの不足膨張噴流の三次元密度場を計測した。また、同じ流れ場をレイノルズ平均ナビエ・ストークス方程式とSST $k-\omega$ 乱流モデルを用いて数値的に求めた。その結果、実験値は数値シミュレーションと定量的によく一致することがわかった。さらに、噴流中心軸上の密度分布は、ほぼ基本モードの波長をもつ波のみで構成されていることがわかった。
- (2) 設計マッハ数が1.5でノズル出口が1 mm×1 mmの正方形断面の超音速ノズルからの不足膨張噴流の三次元密度場を計測した。また、同じ流れ場を微小変動理論を用いて解析的に求めた。その結果、実験値は解析値と定量的によく一致することがわかった。さらに、噴流中心軸上の密度分布は、1次と3次のフーリエモードからなる波で形成されていることがわかった。
- (3) 設計マッハ数が1.5でノズル出口が10 mm×10 mmの正方形断面の超音速ノズルから

の不足膨張噴流と過膨張噴流の三次元密度場を計測した。また、同じ流れ場をレイノルズ平均ナビエ・ストークス方程式とSST $k-\omega$ 乱流モデルを用いて数値的に求めた。その結果、不足膨張噴流に対する実験による密度場は解析値と定量的によく一致することがわかった。この流れ場では、低速噴流でしばしば観察されるAxis-switchingとよく似た現象がノズル出口の角からの膨張波同士の干渉によって形成されることが分かった。過膨張噴流の流れ場では、噴流の第1ショックセル内に形成される衝撃波の流れ方向の位置を除けば、実験と数値計算は定量的によく一致することがわかった。

#### <引用文献>

- ① 田部井勝稲, 白井紘行, 高草木文雄, モアレシュリーレン法による円形および正方形ノズルからの空気不足膨張流の密度測定, 日本機械学会論文集, 第57巻, 第535号, B編(1991), pp. 966-970.
- ② 山口裕, 樫谷賢士, 和田伸一, 斉藤照夫, シャープフォーカシングシュリーレン法の可視化特性, 可視化情報, 第20巻, 第77号, (2002), pp. 52-58.
- ③ 太田匡則, 濱田健太, 前野一夫, 軸対称物体まわりの超音速流れ場に対するCT密度計測, 可視化情報, 第29巻, 増刊2号, (2009), pp. 305-308.
- ④ Kolhe, P., S., and Agrawal, A., K., Density measurements in a supersonic microjet using miniature rainbow schlieren deflectometry, *AIAA J.*, vol.47, no.4, (2009), pp. 830-838.
- ⑤ 宮里義昭, 入江将之, 山本秀樹, 松尾一泰, レインボーシュリーレン偏向法による適正膨張超音速噴流の計測, 日本機械学会論文集, B編, 査読有, 76巻, 768号, (2010), pp. 1129-1133.

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ① Maeda, H., Fukuda, H., Kubo, K., Nakao, S., Ono, D., and Miyazato, Y., Structure of underexpanded supersonic jets from axisymmetric Laval nozzles, *Journal of Flow Visualization and Image Processing*, 査読有, (2018), to be published.
- ② Maeda, H., Fukuda, H., Nakao, S., Miyazato, Y., and Ishino, Y., *European Physical Journal, Web of Conferences*, vol. 180, 査読有, (2018), <https://doi.org/10.1051/epjconf/201818002058>

[学会発表] (計6件)

- ① Maeda, S., Kubo, K., Nakao, S., Ono, D., and Miyazato, Y., CFD simulations of shock containing free jets from square supersonic

- nozzles, Proceedings of the 13th International Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows, (ISAI2017), 2017. 5.8, 沖縄科学技術大学院大学, (沖縄県)
- ② Fukuda, H., Nakao, S., Miyazato, Y., and Ishino, Y., Study of free jets from axisymmetric supersonic micro nozzles (Part 1, Quantitative flow visualization), Proceedings of the 14th International Conference on Flow Dynamics, (ICFD2017), pp. 468 - 469. 2017.11.3, 仙台国際センター (宮城県).
- ③ Fukuda, H., Nakao, S., Miyazato, Y., and Ishino, Y., Study of free jets from axisymmetric supersonic micro nozzles (Part 2, RANS simulation), Proceedings of the 14th International Conference on Flow Dynamics, (ICFD2017), pp. 470- 471, 2017.11.3, 仙台国際センター (宮城県).
- ④ Fukuda, H., Maeda, Y., Ono, D., Nakao, S., Miyazato, Y., and Ishino, Y., Computer flow visualization of underexpanded jets from axisymmetric supersonic micro nozzles, Proceedings of the 11th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing, (PSFVIP-11), 2017.12.2, 熊本大学 (熊本県).
- ⑤ Fukuda, H., Maeda, H., Ono, D., Nakao, S., Miyazato, Y., and Ishino, Y., Rainbow schlieren measurements in underexpanded jets from axisymmetric supersonic micro nozzles, Proceedings of the 27th International Symposium on Transport Phenomena, (ISTP27), 2016.9.23, ハワイ (アメリカ).
- ⑥ Maeda, H., Fukuda, H., Ono, D., Nakao, S., and Miyazato, Y., Application of rainbow schlieren deflectometry for slightly underexpanded supersonic jets from axisymmetric Laval nozzles, Proceedings of the 27th International Symposium on Transport Phenomena, (ISTP27), 2016.9.?, 2016.9.22, ハワイ (アメリカ).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

宮里義昭 (Miyazato Yoshiaki)

北九州市立大学・国際環境工学部・教授

研究者番号：30253537