

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 23 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：15K05805

研究課題名(和文) レインボーシュリーレンCTによる超音速噴流流れ場の三次元定量的可視化法の開発

研究課題名(英文) Developing three-dimensional qualitative visualization method for supersonic jets flow field using rainbow schlieren computed tomography

研究代表者

仲尾 晋一郎 (Nakao, Shinichiro)

北九州市立大学・国際環境工学部・准教授

研究者番号：40331029

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)：本研究では、超音速流れを非接触で三次元的に定量化するために、レインボーシュリーレン偏向法にコンピュータトモグラフィ(CT)を組み合わせた計測法を確立することを目的とする。ノズル出口が1mm×1mmの正方形断面を持つ先細ノズルおよびラバルノズルからの不足膨張噴流に開発したレインボーシュリーレン偏向法にコンピュータトモグラフィ(CT)を組み合わせた計測法を用いて解析した。その結果、ノズルからの不足膨張噴流の流れ場を正確に捉えることができ、定量的に密度場を得ることに成功した。

研究成果の概要(英文)：The rainbow schlieren deflectometry is combined with the computed tomography to obtain three-dimensional density fields of a shock-containing free jet issued from a Laval nozzle(1mm*1mm). Experiments have been performed at a nozzle operating pressure of where the nozzle is operated at a slightly underexpanded condition. Multidirectional rainbow schlieren pictures of the jet can be acquired by rotating the nozzle about its longitudinal axis in equal angular intervals and the three-dimensional density fields are reconstructed by two types of image analyses for experimental data. It is found that excellent quantitative agreement is reached between the jet three-dimensional density fields reconstructed from both the algorithms. The present rainbow schlieren technique is found to be significantly effective to examine a fine shock-cell structure of the shock-containing jet and makes it possible to provide experimental data with high accuracy and reliability on the jet density field.

研究分野：圧縮性流体工学

キーワード：超音速 定量化 可視化 衝撃波 シュリーレン 噴流 3次元

1. 研究開始当初の背景

超音速流れの計測は、静圧あるいは全圧プローブ、熱線流速計等の非接触ではない手法を用いて行われることがよくある。しかし、このような計測方法は必然的に流れ場を乱すため、本来流れが持っている特性が変更される場合がある。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を含んでいるときには、接触測定法は、実験値に顕著な測定誤差を生じさせることが考えられる。さらに、上記に述べた接触測定法は、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しかも詳細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ていることになる。以上のような欠点を克服するため、シュリーレン光学系(表 1)を用いた噴流の流れ場を定量的可視化する新しい方法がいくつか開発され、利用されている。

しかしながら、三次元超音速流れ場の定量化を行った研究は国内のみならず国外でも全くない。よって、本研究では、レインボーシュリーレン偏向法にコンピュータトモグラフィを組み合わせることで、複雑な超音速噴流の流れ場を三次元で定量的に可視化観察する計測法を確立する。

2. 研究の目的

超音速噴流の特性を調べることは、ロケットエンジン等の宇宙産業、スートブロワ、ガスアトマイゼーション、転炉等の工業、不織布等の繊維業、最近では出荷前の白ネギの皮むきとして農業分野においても非常に重要となっている。一般に、超音速流れの特性を理解するには、流れ場のベクトル量(例えば、速度)やスカラー量(例えば、密度、温度、圧力)の情報が必要とされる。このような情報は、衝撃波と境界層の干渉を考慮して、数値計算によって得られることもあるが、数値計算の妥当性は、信頼のおける実験値との比較によってなされる。本研究では、衝撃波と膨張波を含む複雑な超音速流れを非接触で三次元的に定量的化するために、レインボー

表1 代表的なシュリーレン可視化法

シュリーレン法の種類	特徴
モノクロシュリーレン法	ナイフエッジを用い、流れ場をグレースケールで撮影する。しかし、定量化は困難である。
カラーシュリーレン法	流れ場の圧縮領域と膨張領域を色の変化として観察できるが、圧縮および膨張の強さの区別はできない。
モアレシュリーレン法	モアレ縞の変位増幅作用を利用して、密度の定量値が得られるが、衝撃波背後の測定値の精度は低い。
フォーカシングシュリーレン法	光軸に垂直な任意の断面の密度分布を得ることができるが、得られる密度値の精度が非常に低い。
背景シュリーレン法	光源、背景画像、カメラだけの非常に簡単な光学系であるが、得られる密度値の精度が非常に低い。
レインボーシュリーレン偏向法	レインボーフィルターの作製は困難であるが、空間分解能が非常に高く、得られる密度値の精度が非常に高い。

シュリーレン偏向法にCT(コンピュータトモグラフィ)を組み合わせた計測法を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

本実験で用いる超音速の供試ノズルは、図1に示すように、大気吹出し式超音速風洞の集合洞に設置される。圧縮機によって高圧タンクに蓄えられた乾燥空気は、電磁式圧力制御弁を通過して、集合洞で一旦よどみ状態になった後、供試ノズル(1mm×1mmの正方形断面)を通して大気に放出させる。

また、出力250Wのメタルハライド光源からの光は、直径10mmの光ファイバーケーブル、焦点距離16.56mmの対物レンズ、図1の左端に示すピンホール(直径50マイクロ)を通った後、コリメータレンズ(直径100mm、焦点距離500mm)で平行光線となり、集光レンズ(直径100mm、焦点距離500mm)、レインボーフィルター、カメラレンズを通してデジタルカメラの受光素子上に達する。

この光学系を用いれば、軸対称ノズルからの噴流については、レインボーフィルター(図2)の校正曲線を考慮してシュリーレン

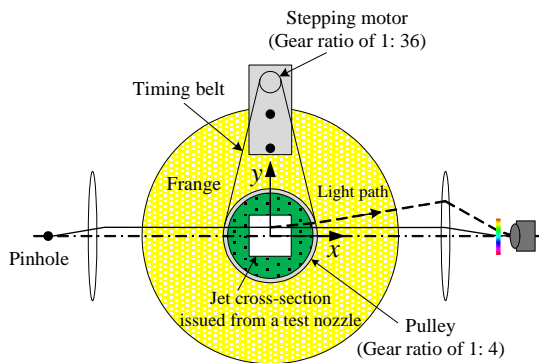


図1 実験装置および光学系

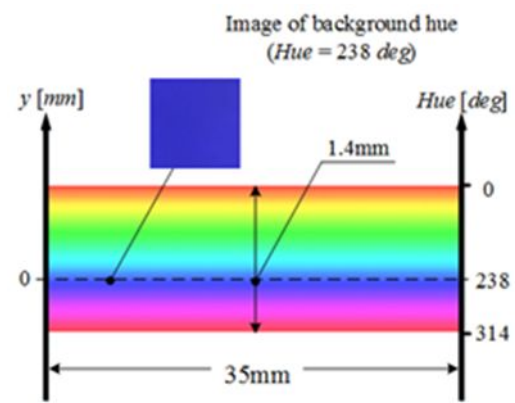


図2 レインボーフィルター

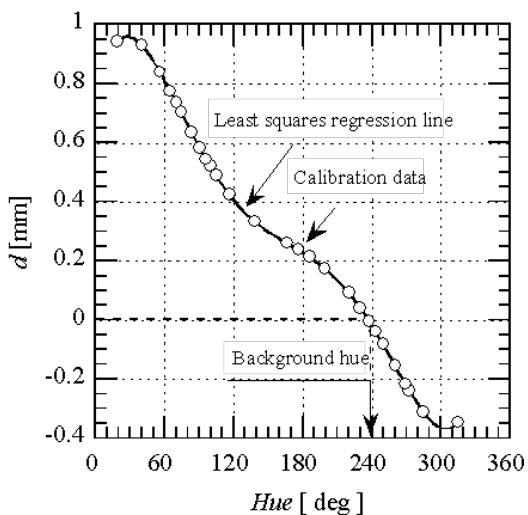
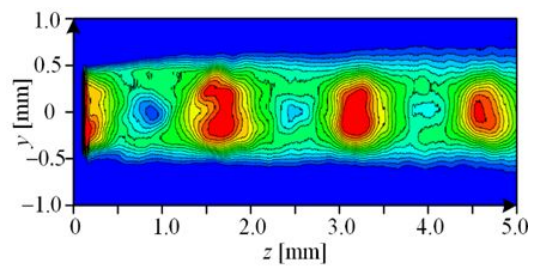


図3 校正曲線

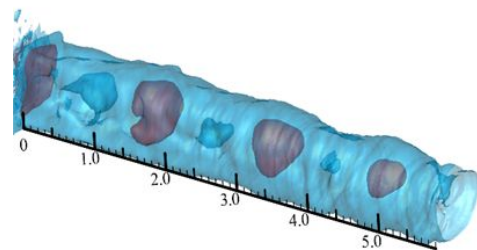
写真の画像値をアーベル逆変換することで密度場を得ることが可能である。本研究ではさらに、レインボーシュリーレン偏向法とCTを組み合わせて超音速噴流の構造を三次元的に定量計測するために、図1に示すようにz軸に垂直な数方向の角度から噴流の光学計測を行う必要があるが、ステッピングモータ

とベルトを用いることで、供試ノズルを望みの角度で連続的に回転できるようにする。

供試ノズルからのマッハディスクを伴う不足膨張噴流に対して、アーベル逆変換の原理を用いて密度場を得た場合と、ノズルを等間隔に回転させて撮影したシュリーレン写真からCTの原理に基づいて解析した場合の密度場(図4)を求め、両者を比較検討する。また、実験と同じ条件で、Fluentによる数値計算を行い、2種類の供試ノズルによる実験値と数値計算結果及び過去の実験結果を比較検討することにより、シュリーレンCT計測による密度値の精度や空間分解能等の知見を得る。



(a) 噴流断面の密度場



(b) 噴流の3次元密度場

図4 密度場計測の一例

4. 研究成果

本研究では、超音速ノズル(1mm×1mmの正方形断面)からの自由噴流に対してシュリーレンCT法を適用することで3次元密度場を計測した。結論は以下のとおりである。

1. シュリーレンCT法によって不足膨張超音速マイクロ噴流の噴流軸に対して垂直な任意の点における断面の密度場を取得することができた。
2. 各ノズルの中心軸上の密度分布はフーリエ基本モードに加えて高次モードの変化も捉えることができた。
3. 超音速マイクロノズルからの自由噴流を計測するにあたって、シュリーレンCT法は有効的な手法であり、不足膨張噴流の特

徴を捉えることができることを証明した。

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3件)

1. 竹下泰史, 高野博史, 久保和範, 仲尾晋一郎, 小野大輔, 宮里義昭, レインボーシュリーレン法による圧縮性乱流境界層の評価, 可視化情報, 37巻, 増刊1号, C207, (2017), 査読有
2. 井上紗綾, 八木奏一郎, 久保和範, 仲尾晋一郎, 小野大輔, 宮里義昭, 低レイノルズ数におけるベンチュリノズル内の衝撃波と境界層の干渉のCFDによる可視化, 可視化情報, 37巻, 増刊1号, C208, (2017), 査読有
3. Maeda, H., Fukuda, H., Nakao, S., Miyazato, Y., and Ishino, Y., European Physical Journal, Web of Conferences, vol. 180, 査読有, 2018, 掲載決定。

[学会発表](計5件)

1. 前田眞之介, 仲尾晋一郎, 宮里義昭, 矩形ラバルノズルからの不足膨張超音速噴流に関する三次元計測, 日本機械学会九州支部久留米講演会, 平成29年10月21日, 久留米工業高等専門学校(福岡)。
2. 前田洋明, 仲尾晋一郎, 宮里義昭, マッハ1.5の軸対称ラバルノズルからの自由噴流の構造(流れの定量的可視化計測), 日本機械学会九州支部久留米講演会, 平成29年10月21日, 久留米工業高等専門学校(福岡)。
3. MAEDA Hiroaki, KUBO Kazunori, NAKAO Shinichiro, ONO Daisuke, and MIYAZATO Yoshiaki. Computer flow visualization of free jets from square supersonic nozzles, 11th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing, 2017.12.2, Kumamoto(Japan).
4. TAKESHITA Taishi, KUBO Kazunori, NAKAO Shinichiro, ONO Daisuke, and MIYAZATO Yoshiaki. Density measurements in compressible boundary layers by rainbow schlieren deflectometry, 11th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing, 2017.12.2, Kumamoto (Japan).
5. 前田洋明, 仲尾晋一郎, 宮里義昭, 石野洋

二郎, 矩形超音速マイクロノズルからの自由噴流の研究(流れの定量的可視化計測), 日本機械学会九州支部第71期総会・講演会, 平成30年3月16日, 九州大学(福岡)。

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

[その他]

該当なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

仲尾 晋一郎 (Nakao Shinichiro)
北九州市立大学 国際環境工学部 准教授
研究者番号: 40331029