

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 18 日現在

機関番号：27101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560204

研究課題名(和文) 衝撃波と膨張波を伴う超音速噴流へのレインボーシュリーレン偏向法の適用に関する研究

研究課題名(英文) Application of Rainbow Schlieren Deflectometry for Shock-Containing 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) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：円筒ノズルからの不足膨張超音速噴流の密度場を測定するためにレインボーシュリーレン法が使用された。その結果、噴流構造は縦切りおよび横切りのレインボーシュリーレン法によって明瞭に観察される。噴流の任意の断面の密度分布はシュリーレン写真のアーベル逆変換によって効果的に推測できる。また、円筒ノズルを通る圧縮流れの特性を予測するための解析モデルが提案され、本実験結果と比較される。さらに、ねぎ皮むき用の現行および新型ノズルからの噴流がレインボーシュリーレン法によって計測され、新型ノズルは現行のノズルより効率が高いことを示す。

研究成果の概要(英文)：A rainbow schlieren system has been employed to determine the density fields in the underexpanded sonic jet from a cylindrical nozzle. As a result, the jet structure can be clearly observed by schlieren pictures with horizontal and vertical rainbow filters. Density profiles at any jet cross-section can be efficiently inferred from the Abel inversion of the schlieren images. Also, an analytical model to predict the flow properties through the cylindrical nozzle is proposed and compared with the present experimental results. Furthermore, conventional and improved nozzles for peeling leeks are used for qualitative and quantitative comparison of jets from their nozzles by the rainbow schlieren deflectometry. It is found that the jet from the improved nozzle has a high removing potential for peeling leeks in comparison with the conventional one.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：衝撃波 超音速噴流 シュリーレン法

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では流れ場を乱すため、本来流れが持っている特性が変更されるかもしれない。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場合には、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十分に考えられる。さらに、上記に述べた接触測定法は、空間分解能や時間分解能が乏しく、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きている。

光学的測定法は、非接触計測の代表例である。例えば、従来から光学計測の超音速流れへの応用としてシュリーレン法とシャドウグラフ法が用いられている。周知の通り、最もよく知られたシュリーレン光学系は、光源、コリメータレンズ（あるいは凹面鏡）、集光レンズ（あるいは凹面鏡）、ナイフエッジ、カメラで構成され、シャドウグラフ法ではこのうちナイフエッジは用いない。両方法とも比較的簡単に光学系を組むことができるが、これらの手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流れの定性的な性質しか得られないことが多い。また、シュリーレン光学系で、ナイフエッジの代わりに三色フィルター（通常、市販のものでは真中が緑色で、その左右が赤色と青色）を用いたカラーシュリーレン法がある。この3色フィルターを使ったカラーシュリーレン法で、例えば衝撃波と圧縮波を光学観察すると、衝撃波と圧縮波の強さが全く異なる場合でも、得られた画像では同じ色（赤色あるいは青色）となる。すなわち、定量的な情報が得ら

れないのみならず、定性的な情報でさえゆがめられることがある。さらに、シュリーレン法、カラーシュリーレン法、シャドウグラフ法では、流れ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。

山口らは、1991年に Weinstein が開発したシャープフォーカシングシュリーレン法を出口直径 0.5mm の先細ノズルからの流れに適用している。この手法では、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。太田らは、2002年に Meier によって開発された背景シュリーレン法を軸対称物体まわりの流れ場に適用した。この手法の特徴は、きわめて簡素な撮影系を用い、背景画像を利用して撮影を行うもので、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、もともとこの手法は屋外での観察のために開発されたもので、フォーカシングシュリーレン法と同様に空間分解能と得られた密度データの精度が良くない。この二つの手法と比べて空間分解能と同時に精度が非常に高い定量的可視化法が Al-Amar らによって開発された。彼らは、シュリーレン光学系のナイフエッジを Greenberg らが開発したレインボーフィルターで置き換えることで、オリフィスからの亜音速噴流を定量的に観察している。また、Kolhe らは Al-Amar らの光学系を使ってオリフィスからの不足膨張噴流の密度分布を計測している。しかし、得られたデータの信頼性の確認は全く行っていない。Kolhe らとほぼ同じ時期に、著者らは、Al-Amar らの開発したレインボーシュリーレ

ン偏向法を軸対称ノズルからの適正膨張超音速噴流に適用した。その結果、得られた密度分布はピトー管測定による実験値および数値解析による計算値と比較して定量的に極めて良く一致することを示した。しかし、過膨張および不足膨張のような衝撃波と膨張波を含む複雑な流れの定量計測は行っていない。したがって、本研究では、従来の計測法をさらに発展させるために、軸対称ノズルからの衝撃波と膨張波を含む超音速噴流の噴流軸に対して垂直な任意の断面の定量的可視化を行う。

2. 研究の目的

超音速流れの研究は、工学的及び学問的に非常に重要である。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、非接触測定法であるレインボーシュリーレン偏向法を衝撃波と膨張波を含む複雑な超音速流れに適用し、超音速流れの定量的可視化法を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究は間欠式の大気吹出し式超音速風洞を用いて行った。圧縮機によって高压タンク (2 m³, 1 MPa) に蓄えられた乾燥空気は、圧力制御弁 (日本工装社製 3600LA/501T) 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れる。

実験では、集合洞圧力 p_{0s} と背圧 (大気圧) p_b との比 p_{0s}/p_b (以下、ノズル圧力比と呼ぶ) が 2.0 ~ 6.0 の一定値となるように圧力制御弁を設定し、ノズルからの噴流のレインボーシュリーレン写真撮影を行った。なお、圧力制御弁は集合洞内の圧力を設定値の ± 0.5

kPa の範囲内で一定に保つことができるが、集合洞内の圧力の測定には半導体圧力センサー (JTEKT 社製 PMS-5M-2) を使用した。

圧力センサーからの電圧信号は、直流増幅器 (JTEKT 社製 AA6210) を通り、12 bit の AD 変換器 (マイクロサイエンス社製 ADM-682PCI) によって 1 kHz 間隔で 100 点間の平均値が取られるようにパーソナルコンピュータで処理された。また、実験は各圧力比で数回行い、統計平均を求めた。

流れの可視化は、小型アルミ光学ベンチ上 (シグマ光機社製 OBA-1000SH) に直線的に配置したシュリーレン光学系によって行った。メタルハライド光源 (シグマ光機社製 : IMH-250) からの白色光は、光ファイバーを通った後、対物レンズ (焦点距離 16.56 mm) で集光され、ピンホール (直径 50 μm) を通過してコリメータレンズ (直径 100 mm, 焦点距離 500 mm) で平行光線となり、集光レンズ (直径 100 mm, 焦点距離 500 mm), 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 (Nikon : D300S) の受光素子上に達する。ピンホールとレインボーフィルターは、それぞれコリメータレンズと集光レンズの焦点距離の位置に配置される。

本実験では、ノズルからの噴流による流れ場の可視化は、レインボーフィルターの設置方法を縦切りと横切りの 2 種類で行った。なお、一連の実験に要する時間は数秒程度で短いため、集合洞からノズル出口下流までの流れは断熱変化と考えられる。したがって、集合洞内の温度は、実験室内の大気温度 $T_b = 294 \pm 0.1$ K に等しいと仮定し、集合洞内の圧力 p_{0s} と空気の状態方程式を用いることで集合洞内の密度 ρ_{0s} を計算した。また実験は、大気密度 $\rho_b = 1.20 \pm 0.05$ kg/m³ および背圧 $p_b = 101 \pm 0.1$ kPa の条件で行われた。以上の条件とレインボーフィルターの校正曲線を使えば、各ノズル圧力比に対する流れ場の密度を得ることができる。

4. 研究成果

円筒ノズル前後の圧力比（ノズル圧力比）を 2.0 から 5.0 まで変化させたときの噴流による流れ場を、レインボーシュリーレン法によって非接触で定量的に可視化計測した。得られた結果を要約すると次のようになる。

(1) レインボーシュリーレン法によって、不足膨張音速噴流のバレル衝撃波とその反射衝撃波、マッハディスク、衝撃波の三重点、ノズル出口からマッハディスク直前までの膨張領域、及び噴流境界等を連続的な色相の変化によって視覚的に示すことができる。

(2) フィルターの色相の変化方向を噴流の軸方向に対して垂直にして撮影したシュリーレン写真では、マッハディスクを構成する反射衝撃波の強さが三重点から足下に向かって徐々に変化する特徴を色相の連続的な変化によって観測することができる。一方、フィルターの色相の変化方向を噴流の軸方向にして撮影したシュリーレン写真では、不足膨張音速噴流の中心軸上のマッハディスクとその下流の第2衝撃波から第4衝撃波までの各衝撃波の位置を流れ方向の色相分布の極値の位置として算出できる。この各衝撃波の位置は、噴流中心軸上の密度勾配が正の最大値の位置とほぼ一致する。

(3) 不足膨張音速噴流の等密度線図は、バレル衝撃波とその反射衝撃波、マッハディスクの近くにおいて密度の急激な変化を示す。また、マッハディスク上流では、噴流境界近くに密度の極大値がある。さらに、本実験では、マッハディスク直後において密度上昇が観察できる。これは、マッハディスクが上流に凸状に湾曲した形状となり、三重点からのすべり線がマッハディスク直後で半径方向に拡がることに起因する。

(4) 不足膨張音速噴流の中心軸上の密度は、噴流内の各衝撃波前後で波状に変化する。また、噴流内の各衝撃波の強さは下流ほど弱いため、衝撃波による密度上昇のピーク値は下

流の衝撃波ほど小さくなる。

(5) 本実験で使用した円筒ノズルに対して、レインボーシュリーレン法によって計測したノズル出口の密度の値は、ノズル内が一次元定常等エントロピー流れと仮定して求めた理論値と比較して小さく、この程度はノズル圧力比の増加とともに増加する。ノズル出口の密度の実験値をノズル上流のよどみ密度で無次元化した値は、ノズル圧力比の増加とともに徐々に減少し、約 0.46 に向かって漸近する。

(6) 円筒ノズルを通る圧縮流れに対して、ノズル入口と出口を囲む検査体積を考え、運動量理論に基づいた解析モデルを提案し、レインボーシュリーレン法による密度の実験結果と比較した。その結果、円筒ノズル出口の密度の解析値は、実験値と定量的に良く一致することがわかった。

次に、レインボーシュリーレン法の適用例として、農業分野で実際に使用されているねぎ皮むき用ノズルからの噴流を計測した。また、ねぎ皮剥きの効率化のために現行ノズルを改良し新型ノズルを考案した。現行ノズルと新型ノズルからの流れ場をレインボーシュリーレン偏向法によって実験的に調べ考察を行った結果を要約すると、次の通りとなる。

(1) 現行ノズルからの噴流はノズル圧力比が 3.0~6.0 の範囲において不足膨張流れであり、噴流内にショックセル構造が観察できる。

(2) 新型ノズルからの噴流はノズル圧力比が 3.0 と 4.0 において過膨張流れ、5.0 のときほぼ適正膨張流れ、6.0 のとき不足膨張流れとなる。

(3) ノズル出口から下流の 10 mm から 20 mm にあるねぎ皮剥きの作業領域内において、現行ノズルの場合と比較して新型ノズルからの噴流の密度は高い。その結果、新型ノズルは現行ノズルより作業効率が高くなることが考えられる。

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)

[学会発表] (計 13 件)

- ① Nakajima, R., Oka, T., Konishi, K., Ono, D., and Miyazato, Y., Application of Rainbow Schlieren Techniques to Shock-Containing Jets from Cylindrical Nozzles, Scitech2014, AIAA Paper, No. 2014-0549, Washington D.C., USA, 2014, 1月13日～1月17日, CD-ROM.
- ② Oka, T., Ono, D., and Miyazato, Y., Study of Shock Trains and Pseudo-Shock Waves in Constant Area Ducts, Scitech2014, AIAA Paper, No. 2014-0949, Washington D.C., USA, 2014, 1月13日～1月17日, CD-ROM.
- ③ Oka, T., Kunimasa, T., Ono, D., Miyazato, Y., Yoshino, K., and Etoh, T., Application of Rainbow Schlieren Techniques for Leek Peeler Nozzle Jets, APISAT2013, Takamatsu, 2013, 11月20日～11月22日, CD-ROM.
- ④ Nakajima, R., Konishi, K., Oka, T., Ono, D., and Miyazato, Y., Density Measurements in Cylindrical Nozzle Jets by Rainbow Schlieren Deflectometry, APISAT2013, Takamatsu, 2013, 11月20日～11月22日, CD-ROM.
- ⑤ 日高陽平, 大田卓弥, 大山祐哉, 大池亜斗夢, 小野大輔, 宮里義昭, 干渉計を用いた遷音速ディフューザ流れの非定常密度場の可視化, 可視化情報, 第 33 巻, 増刊 2 号, 会津, 2013, 9月27日～9月28日, pp. 173-174.
- ⑥ 秋田勇太, 中島涼太, 小西敬三, 小野大輔, 宮里義昭, 円筒ノズルからの不足膨張音速噴流の光学観察, 可視化情報, 第 33 巻, 増刊 2 号, 会津, 2013, 9月27日～9月28日, pp. 59-60.
- ⑦ 岡大志, 國政隆之, 小野大輔, 宮里義昭, 吉野和彦, 江藤敏美, ねぎ皮剥き用ノズルからの噴流の光学観察, 可視化情報, 第 33 巻, 増刊 2 号, 会津, 2013, 9月27日～9月28日, pp. 57-58.
- ⑧ Nakajima, R., Konishi, K., Oka, T., Ono, D., and Miyazato, Y., Quantitative Visualization of an Underexpanded Sonic Jet Issued from a Cylindrical Nozzle Using Rainbow Schlieren Deflectometry, ISAIF11, Shenzhen, China,

2013, 5月6日～5月11日, CD-ROM.

- ⑨ Oka, T., Jiang, S., Isozumi, R., Ono, D., and Miyazato, Y., Experimental Study of Centerline Static Pressure Measurements in Compressible Gas Flows Using Through-Tube System, ISAIF11, Shenzhen, China, 2013, 5月6日～5月11日, CD-ROM.
- ⑩ Oyama, Y., Oike, A., Shimomiya, K., Hidaka, Y., Ono, D., and Miyazato, Y., Quantitative Visualization of Underexpanded Sonic Jet Using Mach-Zehnder Interferometry, ISAIF11, Shenzhen, China, 2013, 5月6日～5月11日, CD-ROM.
- ⑪ Shimomiya, K., Ono, D., and Miyazato, Y., Mach-Zehnder Interferogram Analysis of Axisymmetric Underexpanded Sonic Jet using Fourier-Hankel Methods, AIAA Paper, 2013-0230, Grapevine, Texas, USA, 2013, 1月7日～1月10日, CD-ROM.
- ⑫ 小西敬三, 中島涼太, 小野大輔, 宮里義昭, レインボーシュリーレン法を用いた不足膨張音速噴流の可視化, 可視化情報, 第 32 巻, 増刊 2 号, 姫路, 2012, 10月4日～10月5日, pp. 31-32.
- ⑬ 下宮圭太郎, 小野大輔, 宮里義昭, マッハ・ツェンダー干渉法を用いた不足膨張音速噴流の密度場の可視化, 可視化情報, 第 32 巻, 増刊 2 号, 姫路, 2012, 10月4日～10月5日, pp. 237-238.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮里 義昭 (MIYAZATO YOSHIKI)

北九州市立大学・国際環境工学部・教授

研究者番号 : 30253537