

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：27101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04272

研究課題名(和文) レインボーシュリーレン法による超音速マイクロジェットの3次元構造の解明

研究課題名(英文) Study of the three-dimensional structure of supersonic microjets by rainbow schlieren deflectometry

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) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、円形および矩形断面をもつ先細ノズルからの超音速マイクロジェットの3次元構造をレインボーシュリーレン偏向法を用いた実験と数値シミュレーションによって調べた。その結果、円形および矩形ノズルからのマイクロジェットに関して、ショックセル長さ、超音速長さ、噴流内の最大マッハ数とその流れ方向の位置、マッハディスクの発生位置をノズル圧力比の関数として明らかにした。また、不足膨張状態の円形および矩形先細ノズルからの超音速マイクロジェットの流れ場は、スパイラルモードの非定常特性を示すことが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現時点において、円形および矩形超音速マイクロジェットの3次元密度場の取得に成功した研究報告は、国内および国外においても全くない。しかし、本申請者が開発した装置では、各種の断面形状をもつノズルからの超音速マイクロジェットに対して、高空間分解能で3次元の密度場を取得することが可能である。本研究の成果は次世代航空機用スクラムジェットエンジンの燃料噴射ノズルの効率化や他分野(冶金工学、農工業など)への波及を通じて、流体工学の発展と応用に貢献することが期待できる。

研究成果の概要(英文)：In this study, the three-dimensional structure of supersonic microjets emerging from convergent nozzles with circular and square cross sections was investigated experimentally and numerically by rainbow schlieren deflectometry and large eddy simulation. As a result, the shock-cell length, the supersonic length, the maximum Mach number in the jet and its position in the direction of flow, and the position of the Mach disk were determined as a function of the nozzle pressure ratio for the microjets from circular and rectangular nozzles. The flow fields of supersonic microjets from circular and square convergent nozzles in under-expanded conditions were found to exhibit unsteady characteristics of spiral modes.

研究分野：圧縮性流体工学

キーワード：超音速流れ 衝撃波 超音速噴流 流れの可視化計測 レインボーシュリーレン偏向法

1. 研究開始当初の背景

近年、超音速マイクロジェットは、航空宇宙分野ではジェットエンジンからの排気騒音の低減、医療分野では肺への酸素供給としての利用が期待されており、数多くの研究が行われている。一般に、ノズル出口から音速を超える流れが流出する(超音速ジェットと呼ばれる)場合には、流れ場の内部に衝撃波と呼ばれる不連続波が現れ、衝撃波と超音速ジェットを取囲む自由せん断層との干渉の結果、流れ場は非常に複雑となる。さらに、超音速マイクロジェットでは、ノズル内部の流れの粘性がジェットの構造に強く影響を及ぼすことが予想できるが、それについてはほとんどわかっていない。特に、ノズル出口断面が軸対称以外の超音速マイクロジェットの構造を実験的に明らかにした研究はこれまで全くない。

流れ場の内部のスカラー量(圧力、密度、温度)やベクトル量(速度)等の物理量の定量的な情報を知ることは、流体を利用する機器の性能向上や流れの状態を把握するのに重要であるが、超音速マイクロジェット内部の物理量を実験的に得ることは、衝撃波の存在や空間分解能の制限から極めて困難である。一般に、ピトー管や熱線流速計に代表される接触型の計測器は、流れ場に探査プローブを挿入し、その位置の計測“点”における圧力や速度を求めるときによく利用されている。しかし、超音速の流れ場への探査プローブの挿入は衝撃波の発生により元の流れ場を大きく変化させる原因となり、得られたデータには大きな誤差が含まれる。そのため、最近の超音速流れの計測技術では、光を利用して物理量を取得する手法が主流となっている。しかし、レーザドップラ流速計(LDV)等のレーザー光を用いた代表的な流速測定法は、衝撃波の直後でシード粒子が流れに追従しない問題があり、衝撃波を伴う流れの計測には適していない。一方、従来より圧縮性流れの光学的可視化法として古くからあるシュリーレン法では、超音速流れの内部の物理量の取得は困難であったが、近年における大容量のコンピュータメモリの開発と計算能力の進展および画像処理技術の発達により、シュリーレン光学系を改良した新たな定量的可視化計測法がいくつか開発されている[1]。

1990年代にNASAのラングレー研究所で開発されたフォーカシングシュリーレン法では、フレネルレンズとスリットを用いて多光源を作り、光軸に垂直な任意の断面の位置にカメラの焦点を合わせることによって、その断面における密度場の取得が可能である。しかし、フォーカシングシュリーレン法を用いて超音速流れの密度場を精度よく得た例は現在に至るまで報告されていない。1990年代後半にケンブリッジ大学とドイツ航空宇宙センター(DLR)によってそれぞれ独立に開発された背景シュリーレン法では、光軸方向で測定部の背景に設けた格子等の背景像を実験の前後で撮影することによって、その画像の変化量の情報をもとに光軸に垂直な任意の断面の密度場を得ることができる。レインボーシュリーレン法では、従来のシュリーレン法のナイフエッジの代わりにレインボーフィルターを置くことにより、測定部を通過した光の偏向角の情報を写真撮影した画像の色の变化から知ることによって流れ場の密度を得ることができる。このうち、レインボーシュリーレン法のみがデジタルカメラの受光素子においてピクセル毎に密度値が得られるのに対し、他の2つの可視化法では、数十から数百のピクセル毎に密度値が得られる。すなわち、レインボーシュリーレン法は3つの手法の中で空間分解能が最も高く、超音速マイクロジェットの定量計測に適している。しかし、これまで超音速マイクロジェットの3次元構造をレインボーシュリーレン偏向法によって計測した例は、著者の知る限り、国内および国外においても全くない。

2. 研究の目的

超音速マイクロジェットについては、極最近の研究においてもマイクロピトー管によってジェットの“中心軸上の圧力計測” [2]やシュリーレン法によって、ジェット内部で光軸方向に“空間平均された密度勾配の光学観察” [3]が行われている。しかし、本研究で用いるレインボーシュリーレン光学系では、ノズル出口において任意の断面形状を持つ超音速マイクロジェットの3次元の密度場を光学的に高空間分解能で計測することが可能である。

本研究では、ノズル出口断面が円形および矩形のマイクロノズルからの不足膨張状態の定常および非定常の3次元特性を実験と数値計算によって明らかにする。

3. 研究の方法

本実験では、ノズル出口断面において直径 D_e が 1 mm の円形先細ノズルと 1 辺 H_e が 1 mm の矩形先細ノズルを用いる。先細ノズルの流路壁面形状は、入口から出口まで正弦曲線とし、ノズルの入口と出口の流れが一樣でノズル中心軸に平行となるように設計する。図 1 に示すように、流れの可視化を行うために、光源、スペイシャルフィルタ、コリメータレンズ、デコリメータレンズ、レインボーフィルタ、デジタルカメラで構成されるレインボーシュリーレン光学系を用いる。円形先細ノズルからのマイクロジェットのレインボーシュリーレン写真から密度場を再構成する場合には、アーベル逆変換法を用いる。また、矩形先細ノズルからのマイクロジェットのレインボーシュリーレン写真からコンピュータトモグラフィ(いわゆるCT)の原理を利用して密度場を再構成するために、供試ノズルはその中心軸のまわりに等間隔で任意の角度で回転できるように設置される。ノズルを取り付ける集合洞は、既存の大気吹出し式超音速風洞の高圧タンクに接続され、集合洞内の圧力はその上流に設置された圧力制御弁によって一定に保つように調節する。実験は、集合洞内の圧力 p_{os} と背圧 p_b の比 ($NPR = p_{os}/p_b$: ノズル圧力比) を 3.0 から 7.0 まで変化させて行う。

数値シミュレーションでは、実験と同じ形状の円形および矩形先細ノズルを用い、同じ圧力条件のもとで、 $k-\epsilon$ や SST $k-\omega$ 等の各種乱流モデルを用いて、計算格子の形状や格子数を変化させて円形および矩形マイクロジェットに対する定常計算 (RANS シミュレーション) を行う。次に、Smagorinsky モデルを用いて、円形および矩形超音速マイクロジェットの非定常計算 (ラージエディシミュレーション: LES) も行う。数値シミュレーションの検証は、実験で得られる時間平均密度場との定量的比較によって行い、円形および矩形の先細ノズルからの超音速マイクロジェットの定常および非定常 3 次元特性を明らかにする。

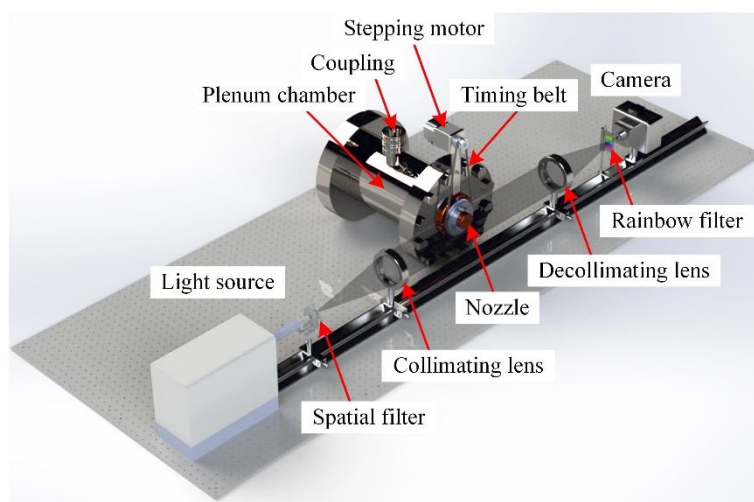


図 1 レインボーシュリーレン光学系

4. 研究成果

円形先細ノズルからの不足膨張状態のマイクロジェット的时间平均特性について、以下の結論が得られた[4]。

- (1) 噴流中心軸に沿う密度分布において、ノズル出口からの最初の極小値の流れ方向の無次元距離 (z_1/D_e) は、NPR を用いて

$$\frac{z_1}{D_e} = 0.67\sqrt{\text{NPR} - 1.89}$$

として与えられる。

- (2) ノズル出口からマッハディスクまでの無次元距離は、 z_1/D_e にほぼ等しく、その位置に

においてマッハ数は最大となる。このときの、最大マッハ数 M_1 は、

$$M_1 = 1 + 0.72(\text{NPR} - 1.89)^{0.76}$$

として与えられる。

- (3) ノズル出口から z_1/D_e の位置までの主流マッハ数は、

$$M = 1 + 1.58\frac{z}{D_e}$$

で与えられる。

- (4) 噴流中心軸上において、ノズル出口からマッハ数が1となるまでの下流方向の最大距離 (超音速長さ: L^*/D_e) は、NPR に対して単調増加する。

円形先細ノズルからの不足膨張状態のマイクロジェットの非定常特性について、以下の結論が得られた。

- (5) マイクロジェットは、第2ショックセルまではほぼ定常であるが、第3ショックセル下流では、噴流中心軸のまわりにスパイラル状に回転する非定常特性を示す。
(6) LES から得られたマイクロジェットの噴流中心軸上の時間平均密度分布は、RANS から得られた結果と比べて実験値と定量的によく一致する。

矩形先細ノズルからの不足膨張状態のマイクロジェット的时间平均特性について、以下の結論が得られた。

- (7) ショックセルに関する従来の解析モデルから導いた噴流中心軸上の密度分布に対して、ショックセルの間隔は実験結果とほぼ等しいが、振幅は実験値を過大評価する。
(8) 噴流のせん断層内における音速境界は、大気密度 ρ_b で無次元化した密度 ρ/ρ_b が 1.2 となる位置として定義できる。
(9) 噴流の中心軸を含む対称断面と対角断面において、噴流境界の幅の流れ方向の変化からアクシススイッチングが発生する位置を定量的に求めることが可能である。

矩形先細ノズルからの不足膨張状態のマイクロジェットの非定常特性について、以下の結論が得られた。

- (10) マイクロジェットは、第2ショックセルまでは安定しているが、第3ショックセル下流では、噴流の中心軸のまわりにスパイラルモードで振動する非定常特性を示す。

参考文献

- [1] Settles, G.S. and Hargather, M.J., A review of recent developments in schlieren and shadowgraph techniques, *Measurement Science and Technology*, Vol. 28, No. 4, (2017), 042001.
- [2] Mironov, S.G., Aniskin, V.M., Korotaeva, T.A., and Tsyryulnikov, I.S., Effect of the Pitot tube on measurements in supersonic axisymmetric underexpanded microjets, *Micromachines*, Vol. 10, No. 4, (2019), 235.
- [3] Wright, S. and Syms, R.R.A., Supersonic jet interactions with a micro-engineering skimmer, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 25, No. 8, 2018, 085017.
- [4] Tashiro, T., Fukunaga, R., Utsunomiya, D., Nakao, S., Miyazato, Y., and Ishino, Y., Flow features of underexpanded microjets emerging from a round convergent nozzle, *Experiments in Fluids*, Vol. 64, No. 3, (2023), 55.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Tashiro, T., Fukunaga, R., Ustunomiya, D., Nakao, S., Miyazato, Y., and Ishino, Y.	4. 巻 64
2. 論文標題 Flow features of underexpanded microjets emerging from a round convergent nozzle	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Experiments in Fluids	6. 最初と最後の頁 55
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00348-023-03603-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------