

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月 17日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2011

課題番号：22760133

研究課題名（和文）レーザー蛍光・りん光法によるMEMS用マイクロ超音速噴流のブレイクダウン長さ計測

研究課題名（英文）Measurement of breakdown length of supersonic micro jets using laser-induced fluorescence and phosphorescence

研究代表者

半田 太郎 (HANDA TARO)

九州大学・大学院総合理工学研究院・准教授

研究者番号：30284566

研究成果の概要（和文）：

近年、超音速マイクロ噴流を工学的に応用する試みが数多くなされている。各種機器に超音速マイクロ噴流を効率良く適用するためにはこの噴流の詳細な構造を理解する必要がある。とくにマイクロ噴流のブレイクダウン長さは、ブレイクダウンが起こると噴流が急激に乱れて広がり始めるので、応用上この長さを知ることは極めて重要である。本研究ではレーザー蛍光・りん光法を用いて超音速マイクロ噴流のブレイクダウン長さを計測した。その結果、ブレイクダウン長さはレイノルズ数の増加とともに減少し、亜音速マイクロ噴流と似た実験結果が得られた。しかしながら、亜音速マイクロ噴流ではブレイクダウン長さはレイノルズ数の逆数に比例するが、超音速マイクロ噴流ではそのような結果とはならなかった。この結果から、超音速マイクロ噴流にはレイノルズ数以外にもブレイクダウン長さを支配するパラメータが存在することが明らかになった。

研究成果の概要（英文）：

Recently, study on supersonic micro jets has been important due to increase of engineering applications such as propulsion, power generation, cooling of MEMS components, and so on. In order to improve the performance of a supersonic micro jet for each engineering application, the detailed characteristics of this flow has to be understood. Especially, it is important to know the breakdown length of the jet because turbulence intensity and the growth rate of jet become suddenly high near the breakdown point. In this research, the breakdown length is measured changing Reynolds number by using laser-induced fluorescence from acetone molecules. As a result, it is found that the breakdown length becomes short with increase of Reynolds number. This agrees with the experimental results of subsonic micro jets. However, the breakdown length of the subsonic jet is known to be inversely proportional to Reynolds number, in contrast, that of the supersonic jet is found not to be inversely proportional to Reynolds number. It is expected from this result that there are some parameters other than Reynolds number that dominates the breakdown length of the supersonic micro jet.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2010年度 | 2,000,000 | 600,000 | 2,600,000 |
| 2011年度 | 1,200,000 | 360,000 | 1,560,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,200,000 | 960,000 | 4,160,000 |

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：圧縮性流れ，超音速流れ，マイクロ流れ

1. 研究開始当初の背景

近年，工学の様々な分野でマイクロ超音速噴流を応用しようとする試みがなされている．例えば，MEMS の構成要素の冷却装置としてマイクロ超音速噴流が有力な候補として挙げられている．マイクロ超音速噴流は亜音速噴流と比べて広がりやすく，流量も多いので，小さい領域を局所的に短時間で冷却できる特徴がある．また，Power MEMS の一つである熱光起電力を利用したマイクロ発電システムにおいて，熱源となる燃焼部の燃料混合にマイクロ超音速噴流（マイクロ超音速エジェクタ）を利用することが試みられている．さらに，マイクロ超音速噴流をスケールの大きい超音速キャビティ流れや超音速噴流に作用させて流れの振動や騒音を低減する方法が提案されている．その他に，小さい衛星（マイクロ衛星）の推進装置，レーザーマシニングなどにマイクロ超音速噴流を利用することが試みられている．噴流の特性を表す重要なパラメータの一つにブレイクダウン長さがある．マクロスケールの噴流（以下，マクロ噴流と呼ぶ）では噴流内の不安定波が大規模な渦を誘起し，これらの渦がある所で崩壊（ブレイクダウン；breakdown）する．一般にノズル出口から大規模渦が崩壊するまでの長さがブレイクダウン長さとして定義される．

マイクロ噴流ではブレイクダウンが起こる近傍で急激に乱れが増加し，噴流は急激に広がり始めるので，ブレイクダウン長さはマイクロ超音速噴流を MEMS 用冷却装置として考えた場合，重要なパラメータになる．さら

に，マイクロ超音速噴流をエジェクタとして用いる場合，混合が飛躍的に促進するのは乱れが急激に増大するブレイクダウン下流の領域である．したがって，マイクロ超音速噴流のブレイクダウン長さを計測することは工学上極めて重要である．

2. 研究の目的

本研究では，レーザー蛍光・りん光法によりマイクロ超音速噴流の流速分布を計測することで，この流れの構造および特性を明らかにすることを目的とする．さらに，実験結果から噴流のブレイクダウン長さを見積もり，マッハ数，レイノルズ数などについて流れの特性を考察するとともに，MEMS にこの流れ場を適用した場合に有用となる知見を得ることを目的とする．

3. 研究の方法

以下の手順で超音速マイクロ噴流の速度計測を行い，ブレイクダウン長さを求める．

(1) 作動気体を窒素とし，アセトンシードで作動気体にアセトンシードする．風洞の上流よどみ室および膨張室の圧力を制御し，超音速噴流を発生させる．なお，圧力比は非粘性流れを仮定して計算される適正膨張圧力比に設定される．

(2) 励起光源として Nd:YAG レーザーの 4 倍高調波（波長 266nm）をレンズ，ピンホールを介して流れ場に照射する．

(3) レーザー照射と同時に現有のイメージインテンシファイア付きの CCD カメラで流れ場の蛍光強度分布を取得する．なお，レーザーパルスごとの蛍光画像を数百ショット取

得し、これらの画像を平均することでレーザー照射位置が求まる。

(4) レーザーパルス照射してから 200~1000nsec 後にデジタル遅延パルス発生器でイメージインテンシファイアのゲートを開放するためのパルス信号を発生させ、蛍光またはりん光強度分布を CCD カメラにより取得する。

(5) (3)と(4)で取得した二つの画像をコンピュータで解析し、レーザーを照射されたアセトン分子の移動量を算出し、流れ場の速度を求める。なお、アセトン分子の移動量は、静止場の蛍光強度分布をローレンツ分布で、流れ場の蛍光強度分布をガウス分布でフィッティングし、フィッティングパラメータの一つである二つの分布のピーク位置の差を取るによって決定できる。本計測システムの空間分解能は画像 1 ピクセルの大きさで決定され、 $\sim 10 \mu\text{m}$ である。イメージインテンシファイアのゲート開放時間は 20ns に設定した。

(6) ノズルを微動装置に設置することにより、レーザービームが流れに対して任意の位置に入射できるようにする。ノズルを流れ方向に移動させることで二次元的な密度変動強さおよび速度の分布が測定可能となる。

上述の手順で取得された実験結果から噴流のブレイクダウン長さを見積もり、レイノルズ数について考察する。

4. 研究成果

本計測法では、アセトン分子の移動量から流れの速度を求めるが、正確な速度を求めるためにはレーザー照射から画像取得までの遅れ時間がある値以上に設定しないと分子の移動量を算出できない。そこで、遅れ時間を変化させて各遅れ時間における測定速度の不確かさを評価した。その結果、本計測システムでは遅れ時間が 200ns 以上になると速度の不確かさはほぼ一定値となる。一定値となる不確かさは噴流周囲で最も大きくなり、10m/s 程度となった。これは噴流周囲では低圧、低密度状態となりアセトンの分子数が少なく蛍光が暗くなるためと考えられる。すなわち、蛍光強度の低下により光子統計的な雑音が大きくなり、分子の移動量の検出に影響を与えたと考えられる。

本研究で測定した速度分布から、超音速マイクロ噴流のブレイクダウン長さを求めたところ、レイノルズ数の減少とともにブレイクダウン長さは増加し、亜音速噴流における過去の実験結果と定性的に一致した。しかしながら、亜音速マイクロ噴流ではノズル出口高さで無次元化したブレイクダウン長さがレイノルズ数の逆数に比例するのに対して、超音速マイクロ噴流ではそのような結果にはならなかった。これは、超音速マイクロ噴流にはレイノルズ数以外にブレイクダウン長さに影響を及ぼすパラメータが存在することを示唆するもので、これは超音速マイクロ噴流特有の性質であると言える。このような性質が本研究で実験的に明らかになった。

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 6 件)

① 半田太郎, 水田倉右, 今村幸平

MTV による気体流れ速度計測 —超音速マイクロ噴流を例として—

可視化情報, 査読有, 32-125, pp.26-31, 2012.

② Masashi KASHITANI, Yutaka

YAMAGUCHI, Taro HANDA, Mitsuharu

MASUDA, Yukihiro HAYAKAWA

Study on Laser-Induced Acetone Fluorescence in Low-Temperature Gases of Nitrogen and Air

AIAA Paper, 査読有, 2012-1062, pp.1-10, 2012.

③ Taro HANDA, Mitsuharu MASUDA,

Masashi KASHITANI, Yutaka YAMAGUCHI

Measurement of Number Densities in Supersonic Flows Using a Method Based on Laser-Induced Acetone Fluorescence

Experiments in Fluids, 査読有, Vol. 50, No. 6, pp.1685-1694, 2011.

④ 今村幸平, 水田倉右, 半田太郎

PLIF を用いたマイクロ超音速噴流の密度計

測に関する研究

可視化情報, 査読無, 30-Suppl.2, pp.303-304, 2010.

⑤ Taro HANDA, Kohei IMAMURA, Sosuke, MIZUTA

Application of Molecular Tagging Velocimetry to a Supersonic Micro Jet

Proceedings of 5th International Symposium on Advanced Science and Technology in

Experimental Mechanics, 査読有, Paper No.

061, pp.1-5, 2010.

⑥ 半田太郎, 今村幸平, 水田倉右

アセトン分子の蛍光を用いたマイクロ超音速噴流の MTV 計測に関する研究

可視化情報, 査読無, 30-Suppl.1, pp.181-184, 2010.

〔学会発表〕(計5件)

① 水田倉右, 安藤佑規, 三井克仁, 半田太郎

アセトンを発光分子とした分子タグ法によるマイクロ超音速噴流の速度計測

平成23年度衝撃波シンポジウム,

2012.03.07-09, 柏市

② 水田倉右, 安藤佑規, 三井克仁, 半田太郎

アセトンを発光分子としたMTVによるマイクロ超音速噴流の計測法に関する研究

高速度イメージングとフォトニクスに関する総合シンポジウム2011, 2011.12.01-03, 熊本市

③ 半田太郎, 水田倉右, 安藤佑規, 三井克仁

アセトンから放射されるLIFを利用した超音速マイクロ噴流の計測法に関する速度研究

第7回学際領域における分子イメージングフォーラム, 2011.11.02, 調布市

④ 半田太郎, 今村幸平, 水田倉右

不足膨張マイクロ噴流のMTV計測

第6回学際領域における分子イメージングフォーラム, 2010.11.08, 調布市

⑤ 半田太郎, 今村幸平, 水田倉右

超音速マイクロ噴流のMTV計測に関する研究

日本機械学会, 第88期流体工学部門講演会, 2010.10.30-31, 米沢市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

半田 太郎 (HANDA TARO)

九州大学・総合理工学研究院・准教授

研究者番号: 30284566