

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 4 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560198

研究課題名(和文) LIF法とMTVによるマイクロノズル内部および外部の超音速流れに特有な現象の解明

研究課題名(英文) Study on the supersonic flows inside and outside a micronozzle using LIF and MTV

研究代表者

半田 太郎 (Handa, Taro)

九州大学・総合理工学研究科(研究院)・准教授

研究者番号：30284566

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、MEMS構成要素の冷却やマイクロ推進装置など工学的に多数の応用があるマイクロノズル内外における超音速流れの現象を非接触計測法であるLIF(Laser-Induced Fluorescence)法とMTV(Molecular Tagging Velocimetry)を用いて計測した。その結果、ノズル外部の流れ(噴流)の超音速領域(超音速コア)がある作動条件になると急激に伸びる(ノズル高さの60～70倍になる)ことが分かった。また、マイクロノズル内部の超音速流れの現象は、大きなノズル内の超音速流れを説明するために用いられてきた概念では説明できないことが分かった。

研究成果の概要(英文)：In the present study, the characteristics of supersonic flows in a rectangular micronozzle were investigated using the LIF (Laser-Induced Fluorescence) and MTV (Molecular Tagging Velocimetry) techniques, both of which are a non-intrusive technique for measuring supersonic flows. The results demonstrated that the supersonic core of the jet issuing from the micronozzle is extended remarkably and becomes 60-70 times longer than the nozzle exit height at a certain operating condition. The results also demonstrated that the phenomenon peculiar to supersonic micro flows occur in the micronozzle; that is to say, the density distributions measured in the nozzle cannot be explained by the concept that has been believed.

研究分野：流体工学

キーワード：マイクロ流れ 超音速流れ 圧縮性流れ レーザー誘起蛍光法 分子タグ法 マイクロ噴流

## 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流れを応用しようとする試みがなされている。例えば、Power MEMS の一つである熱光起電力 (Thermophotovoltaic; TPV) による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エジェクタを利用することが試みられている。また、MEMS 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マイクロ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。さらに、マイクロ衛星の推進装置、レーザーマシニング、プラズマ CVD 薄膜製造装置、超音速キャビティ流れや超音速噴流により生じる振動・騒音の制御などにマイクロ超音速流れを利用することが試みられている。

上述の工学的応用においてマイクロ超音速流れ現象の詳細な理解が不可欠であるが、マイクロノズル内外部の流れの現象は分かっておかない。とくに精緻な実験データがほとんどないので数値解析を実施しても、解析結果を検証し、流れを詳細に考察することがこれまでできなかった。

## 2. 研究の目的

本研究では、マイクロノズル内外部の流れを LIF (レーザー誘起蛍光) 法および MTV (分子タグ法) により計測し、流れの現象の詳細を明らかにすることを目的とする。ノズル内部の現象は LIF 法により流れの密度を計測することで明らかにする。ノズル外部の現象は MTV により流れの流速を計測することにより明らかにする。

## 3. 研究の方法

本研究では、ワイアーカット法で成形されたスロート高さ 286 $\mu\text{m}$ 、出口高さ 500 $\mu\text{m}$  (す

なわち設計出口マッハ数 2.0) のマイクロノズル内外部に発生する超音速流れのパラメータを、非接触法である MTV と LIF 法で計測する。

MTV、LIF 法いずれにおいてもアセトントレーサ分子とし、波長 266nm の Nd:YAG レーザーの 4 倍高調波でトレーサ分子を励起する。アセトンの蛍光寿命は比較的長いのでレーザー照射後アセトンは発光し続け、レーザーで励起したアセトン分子を追跡でき、流速測定が可能となる (MTV)。また、アセトンの蛍光強度は流れの密度のみの関数となるので、蛍光強度を CCD カメラで取得し、解析することで流れの密度分布計測が可能となる。本研究ではノズル外部の流れの速度を MTV で、ノズル内部の流れの密度を LIF 法で測定した。

実験と同時に数値解析も実施した。支配方程式は圧縮性ナビエ-ストークス方程式である。移流項は MUSCL 型の 4 次精度 TVD 法で、粘性項は 2 次精度中心差分で評価し、時間積分には三段階ルンゲクッタ法を用いた。

## 4. 研究成果

マイクロノズルから発生する超音速噴流の流速を様々な作動条件において MTV で計測し、超音速コア長さを見積もった。その結果、レイノルズ数 $\sim 450$  の噴流において超音速コアはノズル出口高さの 60 $\sim$ 70 倍になり、他のレイノルズ数の噴流と比較すると突出して超音速コアが長くなった。実験結果および数値解析結果を詳細に考察すると、レイノルズ数が $\sim 450$  より高い噴流では、流れの不安定性に起因する噴流の崩壊により噴流速度は減衰し、レイノルズ数が $\sim 450$  より低い噴流では、分子拡散により噴流速度が減衰することが分かった。これらの考察結果から、レイノルズ数 $\sim 450$  では流れの不安定性が弱く、分子拡散もあまり顕著でないため、噴流速度は減衰せず、超音速コアが他のレイノルズ数の

噴流に比べて突出して伸びたと結論づけられた。

マイクロノズル内部の超音速流れの密度をLIF法により計測したところ、スケールの大きい(レイノルズ数の高い)ノズル流れとは異なった密度分布が観測された。一般に、垂直衝撃波が発生しないスケールの大きい超音速ノズル流れは、壁面における摩擦を考慮した一次的な解析手法で再現できるが、マイクロノズル内の超音速流れはこの解析手法で再現できなかった。すなわち、マイクロ超音速特有の現象が本研究の実験で観測された。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 7 件)

① Taro HANDA, Hiroaki MIYACHI, Hatsuki KAKUNO, Takaya OZAKI, Shinji MARUYAMA

Modeling of a Feedback Mechanism in Supersonic Deep-Cavity Flows, AIAA Journal, 査読あり, Vol. 53, No. 2, pp.420-425, 2015.

DOI: 10.2514/1.J053184

② Taro HANDA, Katsuhito MII, Takayuki SAKURAI, Kohei IMAMURA, Sosuke MIZUTA, Yuki ANDO

Study on Supersonic Rectangular Microjets Using Molecular Tagging Velocimetry, Experiments in Fluids, 査読あり, Vol. 55, No. 5, Article No. 1725, 2014.

DOI: 10.1007/s00348-014-1725-5

③ Taro HANDA, Aoi NAKANO, Kazuya TANIGAWA, Jun FUJITA

Supersonic Mixing Enhanced by Cavity-Induced Three-Dimensional Oscillatory Flow, Experiments in Fluids, 査読あり, Vol. 55, No. 4, Article No. 1711, 2014.

DOI: 10.1007/s00348-014-1711-y

④ Daisuke ONO, Taro HANDA, Mitsuharu MASUDA

Three-Dimensional Normal Shock Wave/Boundary-Layer Interaction in a Diffuser, Journal of Fluids Engineering-Transactions of the ASME, 査読あり, Vol. 135, No. 4, Article No. 041105, 2013.

DOI: 10.1115/1.4023657

⑤ Taro HANDA, Hiroaki MIYACHI, Hatsuki KAKUNO, Takaya OZAKI

Generation and Propagation of Pressure Waves in Supersonic Deep-Cavity Flows, Experiments in Fluids, 査読あり, Vol. 53, No. 6, pp.1855-1866, 2012.

DOI: 10.1007/s00348-012-1400-7

⑥ 半田太郎, 小野大輔, 久保田浩之, 宮地弘明

レーザ誘起蛍光法とシュリーレン法による超音速キャビティ振動流れの可視化, 日本機械学会論文集 B 編, 査読あり, Vol. 78, No. 791, pp.1318-1326, 2012.

⑦ 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, 査読あり, Vol. 32, No. 125, pp. 26-31, 2012.

〔学会発表〕(計 9 件)

① 半田太郎, 櫻井敬之, 今林浩平, 小池俊輔

MTV を用いた高速流れにおける粒子の抗力係数に関する研究  
平成 26 年度衝撃波シンポジウム, 2015.

半田太郎, 田中晃平, 神原秀仁

LIF 法による超音速マイクロ内部流れの密度計測法に関する研究

平成 26 年度衝撃波シンポジウム, 2015.

③ 田中晃平, 神原秀仁, 半田太郎

レーザー誘起蛍光法によるマイクロ超音速ノズル内流れの数密度測定法に関する研究  
第 10 回学際領域における分子イメージングフォーラム, 2014.

④ Takayuki SAKURAI, Taro Handa, Shunsuke KOIKE, Katsuhito MII, Aoi NAKANO

Study on Particle Traceability in Transonic and Supersonic Flows Using Molecular Tagging Velocimetry  
The 16th International Symposium on Flow Visualization, 2014

⑤ Kohei TANAKA, Taro HANDA, Katsuhito MII

Computational Visualization of Supersonic Micronozzle Flows Validated by Molecular Tagging Velocimetry  
The 16th International Symposium on Flow Visualization, 2014.

⑥ Katsuhito MII, Takayuki SAKURAI, Taro HANDA, Yuki ANDO

LIF Visualization of Supersonic Micro Jets Issuing from a Rectangular Nozzle  
The 12th International Symposium of Fluid Control, Measurement and Visualization, 2013.

⑦ 三井克仁, 中野葵, 小池俊輔, 半田太郎

超音速領域における PIV 計測データの補正方法に関する研究-MTV データとの比較-  
第 45 回流体力学講演会, 2013.

⑧ 半田太郎, 安藤佑規, 三井克仁, 水田倉右

MTV による超音速マイクロ噴流の速度変動

測定法に関する研究

日本機械学会第 90 期流体工学部門講演会, 2012.

⑨ 安藤佑規, 三井克仁, 櫻井敬之, 半田太郎

MTV を用いた超音速マイクロ噴流の速度乱れ計測に関する研究

日本機械学会第 4 回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 2012.

6 . 研究組織

(1)研究代表者

半田 太郎 (HANDA TARO)

研究者番号 : 30284566