

令和元年6月28日現在

機関番号：33924

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04269

研究課題名(和文) 先端流体光計測法による圧縮性マイクロダクト流れに特有な現象と熱伝達特性の解明

研究課題名(英文) Study on the phenomena and heat transfer characteristics in internal compressible microflows using advanced optical diagnostic methods

研究代表者

半田 太郎 (Handa, Taro)

豊田工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：30284566

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：圧縮性マイクロダクト流れに先端的な光計測技術を適用した。本研究の成果は以下の通りである。

(1) マイクロスケール流れ特有の超音速膨張領域が観測された。(2) 超音速マイクロダクト流れには超音速風洞で見られるような垂直衝撃波や擬似衝撃波などの始動衝撃波を介した始動過程がない。(3) 不足膨張状態でダクトを長くし、本来始動衝撃波が現れる長さになってもマイクロダクトでは始動衝撃波が現れない。(4) 先細ノズルに接続されたマイクロダクト内の音速線はレイノルズ数が約2000になるとダクト出口から最も上流に位置する。(5) 圧縮性マイクロダクト流れにおける流路壁面の圧力および壁面温度分布の計測に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、これまで未解明であったマイクロスケールの圧縮性流れに特有な現象を明らかにした点において学術的に意義が高い。また、本研究で得た知見は本流れをマイクロスケールの冷却装置として用いる場合の装置の設計指針となり得るので、社会的にも意義が高い。

研究成果の概要(英文)：The advanced optical measurement techniques have been applied to internal compressible microflows. The following conclusions have been obtained.

(1) A supersonic expansion region peculiar to microduct flow has been observed. (2) Neither a normal shock wave nor a pseudo-shock wave appears in microduct flows. (3) A microduct flow changes gradually its supersonic state with the duct length under an underexpanded condition although a starting shock wave for large scale flows suddenly appears in a duct as its length exceeds a certain specific length. (4) For the compressible flows in the straight duct connected to a convergent nozzle, the length of in-duct choking, which is defined as a length between the sonic line and the duct exit, attains to the maximum at the Reynolds number of ~2000. (5) The temperature and pressure distributions on the duct wall (useful for estimating the local heat transfer on the microduct wall) have been successfully measured.

研究分野：流体工学

キーワード：圧縮性流れ マイクロ流れ 超音速流れ レーザー誘起蛍光法 分子センサー 感圧塗料

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

高速流れをマイクロダクト内で発生させると圧縮性の影響で温度が下がるので、このような流れはMEMS構成要素やCPUなどのマイクロスケール領域の冷却へ応用が考えられる。マイクロスケール領域の冷却に液体流れ(気液二相流)を用いた研究が多くなされる一方で、気体流れを冷却に用いると熱伝達率は低くなるものの冷却対象に熱以外の影響を及ぼさず、冷却装置として簡素な設計が可能となる。さらに、液体流れで生じるバーンアウト点近傍の不安定現象も気体では起こらない。大型計算機のようにCPUが多数ある場合、メンテナンスの容易な気体流れによる冷却は魅力的であると言える。しかしながら、計測の困難さから圧縮性マイクロダクト流れの流動状態が良く分かっていないのが現状である。

2. 研究の目的

本研究では、上記1の研究背景をふまえ、先端的な非接触光計測技術を用いて圧縮性マイクロ内部流れに特有の現象を明らかにし、本流れをマイクロスケール領域の冷却へ応用したとき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

圧縮性マイクロ内部流れの特性を明らかにするために、非接触光計測技術(レーザー誘起蛍光法および分子センサー)を用いて流路内の数密度および壁面圧力・温度を計測した。さらに、三次元圧縮性ナビエ-ストークス方程式を基礎方程式とした数値シミュレーションを実施した。実験で観測された圧縮性マイクロダクト流れ特有の現象の詳細を、数値シミュレーション結果を用いて考察した。

4. 研究成果

本研究の成果は以下の通りである。

(1) 超音速ノズルに接続された断面積一定の短いマイクロダクト内の流れにおいて、スケールの大きな超音速流れでは現れない、超音速膨張領域が観測された。また、数値シミュレーションによりこの膨張領域が発生する物理的な理由を明らかにした。

(2) スケールの大きなダクト流れでは、垂直衝撃波や擬似衝撃波などの始動衝撃波を介してダクト内の流れ場は形成されるが、マイクロスケールの流れではダクト部に始動衝撃波が現れず、始動衝撃波を介さずに超音速流れが形成される。

(3) 不足膨張状態を保った状態で超音速ノズルに接続された断面積一定のダクト部を長くすると、あるダクト長さを超えると大きなスケールの流れでは始動衝撃波に相当する垂直衝撃波または擬似衝撃波が現れ、ダクト出口部でマッハ数1となる流れになる。しかしながら、マイクロスケールの流れではダクトを長くしても始動衝撃波は現れず、境界層を除く領域の流れは超音速状態のままであり、ダクト出口部でマッハ数1となるような流れは現れない。

(4) 先細ノズルに接続した断面積一定ダクト内の流れにおいて音速に達する位置を調べたところ、この位置は流れのレイノルズ数が約2000になると、ダクト出口部から最も上流に位置する。

(5) 分子センサーを用いて圧縮性マイクロ流れにおける流路壁面上の圧力および温度の計測に成功した。本計測結果は圧縮性マイクロ流れの詳細な現象を明らかにし、局所熱伝達特性を評価する上で有用なデータをなり得る。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計5件)

Taro Handa, Keiichiro Kitahara, Yu Matsuda, Yasuhiro Egami
Peculiarities of low-Reynolds-number supersonic flows in long microchannel, *Microfluidics and Nanofluidics*, 査読有, 23 (2019), 88.
DOI:10.1007/s10404-019-2256-4

Bing Han, Yu Matsuda, Yasuhiro Egami, Taro Handa
Investigation on choking behavior of gas flow in microducts, *Microfluidics and Nanofluidics*, 査読有, 22 (2018), 122.
DOI:10.1007/s10404-018-2143-4

Taro Handa, Urita Akira
Experimental study of small supersonic circular jets actuated by a cavity, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 査読有, 96 (2018), 419-429.
DOI:10.1016/j.expthermflusci.2018.03.031

Taro Handa, Hideto Kambara, Masaru Harada
Visualization of Supersonic Microjets Using LIF and MTV Techniques
IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 査読有, 249 (2017), 012016.
DOI:012016. 10.1088/1757-899X/249/1/012016

Taro Handa, Yu Matsuda, Yasuhiro Egami
Phenomena peculiar to underexpanded flows in supersonic micronozzles
Microfluidics and Nanofluidics, 査読有, 20 (2016), 166.
DOI:10.1007/s10404-016-1831-1

〔学会発表〕(計 17 件)

Han Bing, 松田佑, 江上泰広, 半田太郎, Application of PSP in Measuring Pressure and Temperature of Gas Flow in Microduct, 平成 30 年度衝撃波シンポジウム (2019).

Bing HAN, Taro HANDA, Measurement of Number Density in Microduct Gas Flows, Using Laser-Induced Fluorescence, 29th International Symposium on Transport Phenomena (2018).

Tepei KAWATA, Akira KOTANI, Taro HANDA, Study on Characteristics of AA-PSP Response Using a Shock Tube, 29th International Symposium on Transport Phenomena, Paper No. ISTD29-043 (2018).

Taro HANDA, Shunsuke KOIKE, PIV and MTV Measurement of Highly Accelerated and Decelerated Supersonic Flow and Correction of PIV Data, 第 50 回流体力学講演会 / 第 36 回航空宇宙数値シミュレーション (日本航空宇宙学会(JSASS)とアメリカ航空宇宙学会(AIAA)の Joint Session として) (2018).

半田太郎, 武村実穂, 大谷清伸, 鶴飼孝博, 高周波運動量付加用スモールジェットの超音速流中での動作とその効果に関する実験的研究, 平成 29 年度衝撃波シンポジウム (2018).

半田太郎, 松田佑, 江上泰広, LIF 法による超音速マイクロ内部流れ計測と現象解明, 第 13 回学際領域における分子イメージングフォーラム (2017).

Bing Han, Taro Handa, Yu Matsuda, Yasuhiro Egami, Computational study on compressible flows in straight rectangular microducts, 14th International Conference on Flow Dynamics (2017).

Taro Handa, Keiichiro Kitahara, Akira Urita, Bing Han, Yu Matsuda, Yasuhiro Egami, Measurement of number density in supersonic microduct flows using LIF method, 9th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference (2017).

Taro HANDA, Optical Measurement Methods for High-Speed Gas Flows, International Conference on Materials and Systems for Sustainability 2017 (ICMaSS 2017) (2017) (招待講演).

半田太郎, 松田佑, 江上泰広, LIF 法を用いた超音速マイクロ内部流れの密度計測と流れ解析, 平成 28 年度衝撃波シンポジウム, (2017).

岡堯志, 半田太郎, 松田佑, 江上泰広, 赤木富士雄, 山口住夫, 山邊光一郎, 益田悠平, AA-PSP を用いたキャピティ流れをともなう超音速混合場の計測, 日本機械学会第 94 期流体力学部門講演会 (2016).

半田太郎, MTV による超音速マイクロ流れ速度変動計測法の実現可能性に関する研究, 第 12 回学際領域における分子イメージングフォーラム (2016).

Taro Handa, Hideto Kambara, Masaru Harada, PLIF Investigation of compressible microjets issuing from a rectangular convergent nozzle, 13th International Conference on Flow Dynamics (2016).

半田太郎, 気体流れ計測用 MTV の現状と展望, 第 54 回飛行機シンポジウム (2016).

Takayuki Oka, Taro Handa, Yu Matsuda, Yasuhiro Egami, Fujio Akagi, Sumio Yamaguchi, Koichiro Yamabe, Yuhei Masuda, Investigation of supersonic mixing enhanced by

cavity-induced oscillatory flow using AA-PSP, 27th International Symposium on Transport Phenomena (2016).

岡堯志,半田太郎,松田佑,江上泰広,赤木富士雄,山口住夫,山邊光一郎,益田悠平,AA-PSPを用いたキャビティ流れが作用する超音速混合場の圧力振動の可視化,第44回可視化情報シンポジウム(2016).

半田太郎,神原秀仁,原田大,アセトン分子を発光分子としたLIF法による圧縮性マイク口噴流の可視化,第44回可視化情報シンポジウム(2016).

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年:
国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年:
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 松田 佑

ローマ字氏名: (MATSUDA, Yu)

所属研究機関名: 早稲田大学

部局名: 理工学術院

職名: 准教授

研究者番号(8桁): 20402513

研究分担者氏名: 江上 泰広

ローマ字氏名: (EGAMI, Yasuhiro)

所属研究機関名: 愛知工業大学

部局名: 工学部

職名: 教授

研究者番号(8桁): 80292283

(2) 研究協力者

研究協力者氏名:

ローマ字氏名:

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。