

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14657

研究課題名（和文）マイクロ空間における流速測定手法の開発と微小気体流量計測の高度化への展開

研究課題名（英文）Development of flow velocimetry in micro-space and its application to advanced micro-gas flow measurement

研究代表者

竹川 尚希（TAKEGAWA, Naoki）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・研究員

研究者番号：20828157

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、マイクロメートルオーダーの温度センサーから、微小空間内の流れを乱すことなく、流速を計測する手法について開発、検証した。本手法の妥当性を担保するため、国家標準にトレーサブルな流速計測に基づく評価実験を行った。実験結果より、流速が60 m/sから95 m/sの範囲において、本手法と流速標準との差は5%以内に収まることが確認された。さらに、本手法をノズル内部の流速計測に適用した実験を実施し、数値シミュレーションとの比較を行った。計測されたノズル内の超音速流は、数値シミュレーション結果と良好に一致することが確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

既存の安価な温度計により、低擾乱かつ高空間解像度な流速計測を幅広い流速レンジで実現できたことは特筆すべきものである。本手法の計測原理は物理モデルに基づいているため、校正に要する労力が極めて少なく、一般の技術者が簡便に使えるという点においても社会的意義が大きいものと言える。また、微小空間内の流速計測という問いに対して、既存の流速計測手法とは全く異なるアプローチを用いた点も学術的価値が高い。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed and verified a method to measure flow velocity from micrometer-order temperature sensors installed at two points without disturbing the flow in a micro-space. To ensure the validity of the method, an evaluation experiment based on flow velocity measurements traceable to national standards was conducted. The experimental results showed that the difference between the method and the velocity standard was within 5% in the velocity range of 60 to 95 m/s. Further experiments were conducted to apply this method to flow velocity measurements inside a nozzle and to compare the results with numerical simulations. The measured supersonic flow inside the nozzle was confirmed to be in good agreement with the numerical simulation results.

研究分野：流体工学

キーワード：流体工学 境界層 回復温度 臨界ノズル 空間分解能 熱電対 白金抵抗測温体

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、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

気体流量計測は、世界的に重要な工業計測の1つである。天然ガスなどのエネルギー資源取引、航空機および自動車のエンジンテスト、排気ガス測定や環境分析など様々な産業分野で幅広く利用されており、いずれも現代の社会活動には欠かせないものである。石油、天然ガス、化学工業などの分野では、流量計測技術が深く関連しており、その経済的影響から流量計測の同等性(精度)および信頼性(トレーサビリティ)が極めて重要であることは言うまでもない。我が国の気体流量計測では、国家標準の移転標準器として臨界ノズルが使用されている(図1)。

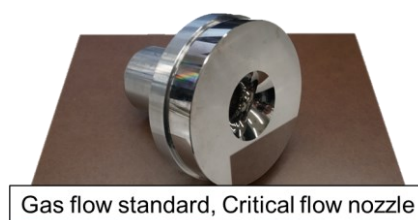


図1 臨界ノズル

近年、半導体製造プロセスやアシストガス加速法(レーザー加工)で微小流量制御の要望が高まりつつあり、また、分子クラスターを生成する超臨界分子流法など、非常に小さな口径を有する臨界ノズルが注目を集めている。一方で、その小ささゆえ、微小臨界ノズル内の物理量を正確に計測することは極めて難しい。そのため、2005年に制定されたISO 9300では、低レイノルズ数領域、すなわち、微小流量領域での臨界ノズルの設計・運用基準が確立されていない。産業界や国際規格におけるニーズの拡大に応えるため、微小臨界ノズル内の流れ場を正確に把握することは必要不可欠である。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、プローブ型温度センサーによって得られる回復温度から、流速分布を高空間解像度で計測する新たな手法について確立し、その手法を応用することで微小臨界ノズル内の流れ場を明らかにすることである。これまでピトー管、熱線流速計、PIV、LDVなど多種多様な流速計測手法が提案されてきたものの、現状の流速計測では、小型機器を使用した場合においても、その大きさがボトルネックとなる。例えば、細線を用いた計測が特徴的な熱線流速計は乱流計測などに幅広く利用されている一方で、細線を支える2本以上の支柱がしばしば流れに影響を与え、プローブの挿入角度などが問題となる。また、熱線長が数mm存在するため、流速はmmオーダーでの線平均(線計測)となる。PIVやLDVなどの光学的手法は、ピトー管や熱線流速計と比較して、高額な機器を使用するため導入の障壁となっており、トレーサ粒子やレーザー光の入射・反射が必要となる点も、実現場への適用が難しい理由として挙げられる。そこで本研究では、物体表面で計測される回復温度とよどみ点温度の差から流速を求める手法RTA(Recovery Temperature Anemometry)について注目し、2つの実験と1つの数値シミュレーションを実施した。回復温度の計測に小型の熱電対と白金抵抗測温体を用いることで(図2)、低擾乱かつ高空間解像度を有する点計測の実現にチャレンジした。

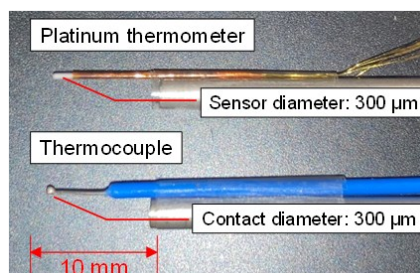


図2 使用した小型温度センサー

### 3. 研究の方法

#### (1) 計測原理

RTAの計測原理を次に記述する。プラントル数(動粘性係数/熱拡散係数)が1.0以下である気体の流れでは熱拡散の影響が大きいため、流れをせき止めない物体の壁面温度はよどみ点温度 $T_0$ よりも小さな値を示す。この特別な温度を回復温度 $T_r$ と呼ぶ。そして、この温度差は主流流速の2乗に比例するため、温度場に基づいた流速分布の計測が可能となる。ここで、水などプラントル数が1.0よりも大きな値を示す流体については、よどみ点温度と回復温度に差が生じないことに注意されたい。

#### (2) 流速標準との比較実験

RTAの計測精度を評価するため、流速の国家標準との比較試験を実施した(図3)。流速標準は、臨界ノズルに基づく流量標準より導出している。臨界ノズルは背圧比(ノズル下流圧/上流圧)が臨界背圧比以下になると、断面積が最も小さいスロートでの流速が音速となり、一定の流量値を示すため高精度な流量計測が可能となる。試験ライン上流側に設置した緑のノズルバンクには複数の臨界ノズルが並列に取り付けられており、ブローにより一定以上の差圧を与えることで $5 \sim 1000 \text{ m}^3/\text{h}$ の安定した流量を管路内に発生させる。風洞出口の体積流量、断面積(出口径: 60 mm)、境界層厚さより、トラバース装置に固定された温度計センサー位置での流速の標準値を算出している。RTAにより流速を計算する際は、回復温度のみならずよどみ点温度が

必要であり、流線上の流体が有するよどみ点温度は風洞上流側において白金抵抗測温体を用いて計測している。流速を求める際に必要となる回復温度係数に関して、層流境界層における平行平板では約 0.85 であることが知られている。本研究では、流速標準と実験結果が一致するようにプローブ型の回復温度係数として熱電対および白金抵抗測温体の両方に 0.83 を用いた。実験結果より定めた回復温度係数 0.83 と上述の文献値数 0.85 との間で確認される差は、RTA で用いる温度計の形状が並行平板ではなくプローブ型であることに起因すると考えられる。RTA は物理モデルであるため多くの定数を必要としないものの、回復温度係数に関しては使用する温度計固有の値として与えられる必要があることに注意されたい。

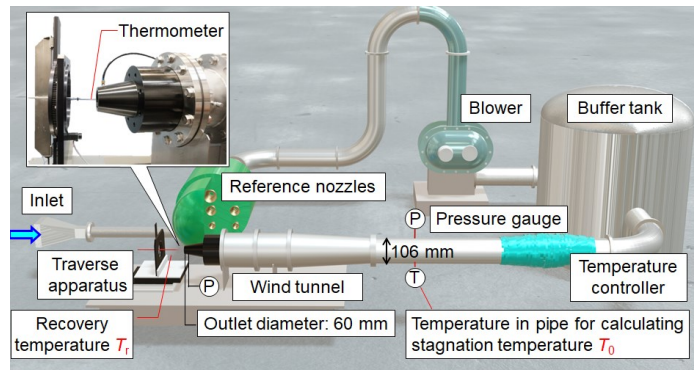


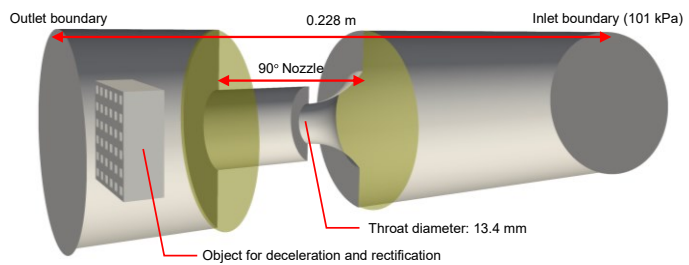
図 3 流速の国家標準と RTA の比較実験

### (3) 臨界ノズル内流れの流速計測と数値シミュレーション

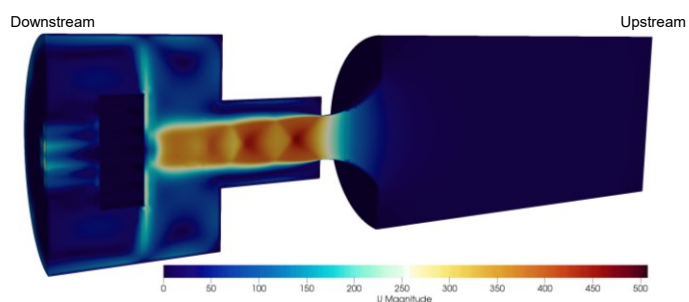
流速標準との比較を行い、RTA による流速計測の妥当性を検証した上で、熱電対および白金抵抗測温体を用いた RTA を臨界ノズル内部の流速計測に適用した。上述の流速標準との比較試験とは異なり、ノズル内の各空間位置における基準値（標準値）が存在しないため、数値シミュレーションの結果を参考にする。図 4 に数値シミュレーションの概要、図 5 に RTA を用いたノズル内流れの流速計測に関する実験概要を示す。

数値シミュレーションは、流体解析ソフトウェア OpenFOAM を用いて、非定常三次元解析を実施した。シミュレーション領域に関して、90°ノズル内部の形状は実験と同様の寸法を再現した。一方、ノズル上流部および下流部については実験と同様の形状・空間ボリュームを有するものではない。ノズル出口下流側には、出口境界における流速の均一化および解析領域の削減を目的として、整流部が設けた。解析時は上流圧およびノズル内部圧を 101kPa とし、実験と同様に臨界背圧比以上の差圧を与え、スロートを通過する質量流量が安定した際の流れ場を結果として出力した。

実験で用いたトラバース装置の上流部には、90°ノズル（スロート径：13.4 mm）と呼ばれるディフューザーを持たない臨界ノズルが設置されている。90°ノズルの臨界背圧比は約 0.53 であり、真空ポンプと制御バルブを用いてノズルに十分かつ一定の差圧を与え、ノズル上下流の圧力計により背圧比を求めた。回復温度はトラバース装置に固定されている熱電対または白金抵抗測温体、流線上の流体が有するよどみ点温度はノズル上流の白金抵抗測温体で計測し、①スロートの中心位置における流速、②軸方向の流速、③スロートより 1 mm 下流における半径方向の流速の 3 項目について検証した。



(a) シミュレーション領域



(b) シミュレーション結果の一例（流速コンタ）

図 4 数値シミュレーションの概要

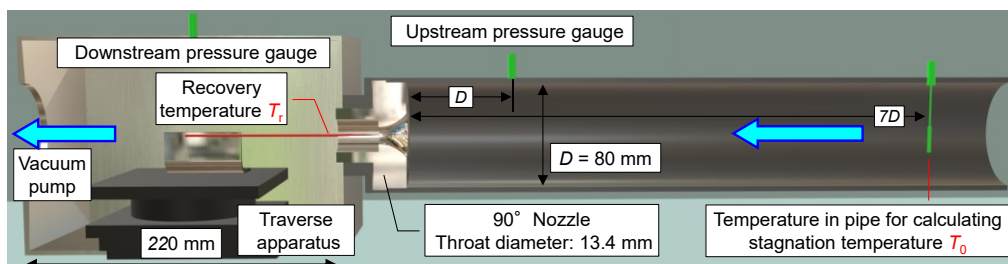
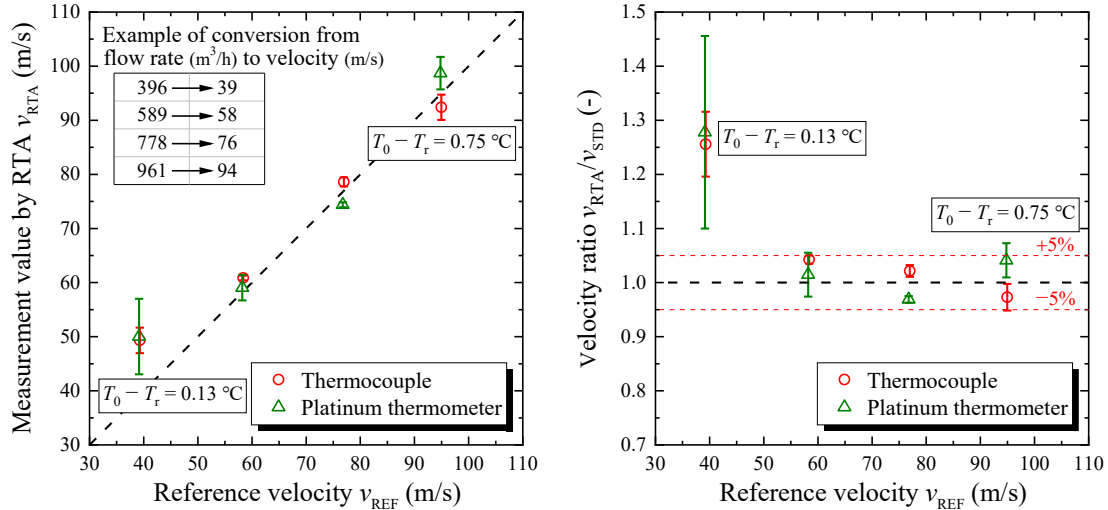


図 5 流速の国家標準と RTA の比較実験

#### 4. 研究成果

##### (1) 流速標準との比較実験

図6に流速の標準値  $v_{REF}$  と RTA による計測値  $v_{RTA}$  の関係を示す。図6(a)および図6(b)は、それぞれ絶対値および比率に基づく評価である。各流速点における計測は3回ずつ行われ、プロットは平均値、エラーバーは標準誤差を表している。図6(b)から流速が40 m/s 近傍では  $v_{REF}$  と  $v_{RTA}$  との差が最大で約30%程度確認され、他の流速点と比較して標準誤差も大きい。これは、40 m/s 近傍ではよどみ点温度  $T_0$  と回復温度  $T_r$  の差は約0.13 °Cであるため、温度計測の精度が影響していると考えられる。一方、流速が60~95 m/s の範囲では、 $T_0$  と  $T_r$  の温度差は約0.75 °Cまで拡大し、熱電対および白金抵抗測温体の両方において  $v_{REF}$  と  $v_{RTA}$  との差は5%以内に収まっている。このことから、 $T_0$  と  $T_r$  の温度差が拡大する流速の大きい範囲では、使用する温度計に依らず高い精度が期待できる。 $v_{REF}=75$  m/s と比較して  $v_{REF}=95$  m/s では、熱電対および白金抵抗測温体の両方において  $v_{RTA}$  の標準誤差が増大している。これは、臨界ノズルとブローを用いて最大1000 m<sup>3</sup>/h の流量を発生させる際、管路内における温度変動が増大するためであると考えられる。



(a) 絶対値による比較

(b) 比率による比較

図6 流速の標準値  $v_{REF}$  と RTA による計測値  $v_{RTA}$  の関係

##### (2) 臨界ノズル内流れの流速計測と数値シミュレーション

図7は、RTA で計測したスロート中心の流速値である。赤縦線は90°ノズルの臨界背圧比を示しており、黒横線は、スロートにおける音速の理論値315 m/sである。まず、臨界背圧比以下の各背圧比(0.5, 0.4, 0.37)領域において、ノズル上下流の圧力差が異なるにもかかわらず、RTA で計測した流速がおおよそ一定となっており、臨界ノズルの定性的な特徴を良好に捉えている。次に、RTA および数値シミュレーションでは、理論値315 m/s よりも最大で約7%低い値を示している。これは、音速の理論式が流入部における曲率の影響を考慮していないことに起因する。既往研究では、スロート中心での流速低下が知られており、RTA と数値シミュレーションは、既往研究と調和的な傾向を示している。また、背圧比0.45を例に挙げると、RTA と数値シミュレーションでは、流速が約3.5%の範囲で一致しており、高い計測精度を有していることがわかる。これらの結果から、 $\mu$ m オーダーの温度センサーにより低擾乱な計測が実現され、小口径ノズル内の音速流に対しても RTA は、適用可能であることが明らかになった。

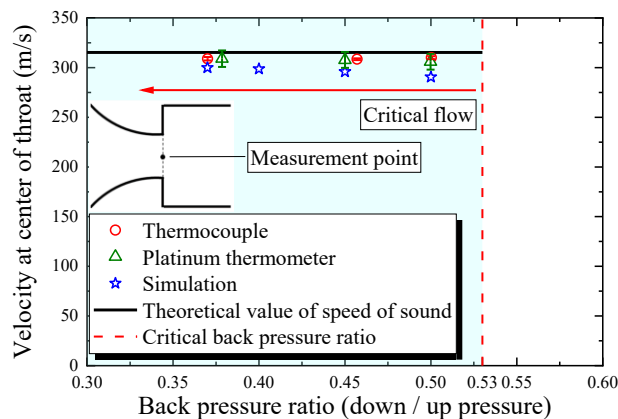


図7 背圧比とスロート中心における流速の関係

図8は、スロート中心から軸下流方向へ1 mm 間隔で  $x_{axial} = 10$  mm までトラバース計測である。それぞれの結果は、背圧比を0.4に固定した条件で取得した。RTAでは、 $x_{axial} = 7$  mmでは流速が約415 m/s、マッハ数が約1.3まで増加しており、超音速流に対してもRTAが成立している。また、 $x_{axial} = 7 \sim 9$  mm以降の下流側において流速が減少しており、ノズル内で生じる上述の衝撃波現象についても捉えることが可能である。スロート中心において実験と数値シミュレーションは流速に関して良好な一致をみせているものの、スロート下流では最大で10%程度の差が確認される。これは、数値シミュレーションではノズル下流のトラバース装置内の空間を完全に再現できていないことに起因する。流入境界と流出境界の圧力比を0.4としているものの、ノズル出口の圧力場が実験とは異なる可能性が存在し、ノズル下流側においてこの影響をより受けると考えられる。

本研究では、回復温度とよどみ点温度に基づく流速計測であるRTA (Recovery Temperature Anemometry) について検証を行った。本手法の妥当性を担保するため、国家標準にトレーサブルな流速計測に基づく評価を行うことは、独自性が強いと考えられる。RTAをノズル内音速流に適用した場合においても、実験結果と数値シミュレーション結果が良好に一致していることから、RTAによる超音速流計測の可能性が示唆された。また、熱電対または白金抵抗測温体のどちらを用いても同等の結果が確認されており、RTAによる流速計測が温度計の種類に依存しないということは非常に貴重な知見である。また、本研究で使用した温度計は市販品であるため、一般の技術者が簡便に使えるという点においても有用性が高い。RTAを用いた今後の展望として、熱電対の計測範囲は高温域にも及ぶため、宇宙航空分野で特徴的な高エンタルピー流れにも適用可能だと考えられる。また、小型温度計のセンサー部は熱容量が小さいため、流速変動に対する応答性も高いと考えられ、乱流研究への応用についても期待ができる。

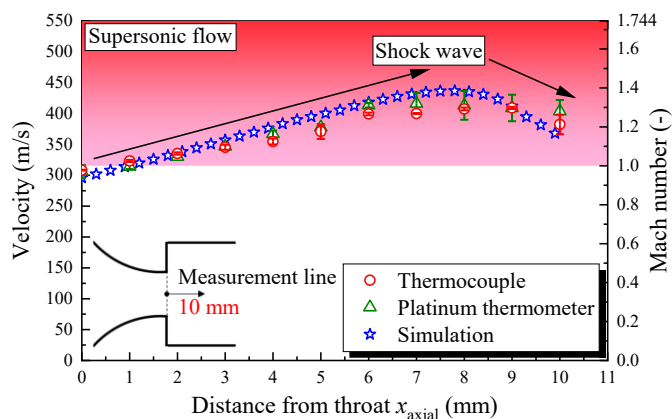


図8 スロート中心から下流 10 mm までの軸方向流速分布

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 1件）

1. 著者名 Takegawa Naoki, Ishibashi Masahiro, Iwai Aya, Furuichi Noriyuki, Morioka Toshihiro	4. 巻 11
2. 論文標題 Verification of flow velocity measurements using micrometer-order thermometers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 23778
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-021-02877-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 竹川尚希
2. 発表標題 熱電対を用いた流速計測手法の精度検証に関する実験
3. 学会等名 2021年度日本機械学会年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 竹川尚希, 森岡敏博
2. 発表標題 熱電対を用いたノズル内音速流の計測
3. 学会等名 2020年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 竹川尚希, 古市紀之
2. 発表標題 熱電対を用いた流速計測とその応答性推定
3. 学会等名 2022年度日本機械学会年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Naoki Takegawa, Noriyuki Furuichi
2. 発表標題 Velocity measurement in critical flow nozzle and its response using recovery temperature anemometry (RTA)
3. 学会等名 Proceedings of the19th Conference on FLOMEKO (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔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