

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04270

研究課題名(和文)ノズル外表面温度に基づく圧縮性内部流れの診断法(衝撃波を伴う流れの温度回復係数)

研究課題名(英文)Diagnostics of Internal Compressible Flows based on Nozzle Temperature
(Temperature Recovery Factor in Flows with Shockwave)

研究代表者

片野田 洋(KATANODA, Hiroshi)

鹿児島大学・理工学域工学系・教授

研究者番号：40336946

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)：供試ノズルの壁面静圧から求めたマッハ数とメタル温度から温度回復係数を計算した結果、 $r = 0.835$ となった。そこで、本研究では $r = 0.835$ とした。貯気室にバンドヒーターを巻いて貯気温度を大気温度よりも約10度高めた状態で実験を行った。実験の結果、 $x=0$ をスロートとして $x=140\text{mm}$ までは本診断法によるマッハ数は、壁面静圧から求めた検証用のマッハ数とよく一致した。しかし、 $x > 140\text{mm}$ では、バンドヒーターの有無に関わらず検証用のマッハ数よりもかなり低くなった。これは、バンドヒーターによる作動ガスの加熱が不十分であったためであると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ノズル外表面温度から内部流れを診断する方法は申請者が考案したもので、流路に静圧孔や観測窓を設ける必要がない。そのため、大小様々な研究用の管路や実稼働している管路に適用することができる。加えて、熱電対や赤外線カメラで流路の温度を測定すればよいので、安価な測定法である。本研究の結果、流路の出口近傍を除いて本診断法は内部流れのマッハ数を適切に測定できることが分かった。ノズル出口近傍については測定結果に誤差が生じる原因を明らかにするとともに、本診断法をさらに改良する必要がある。

研究成果の概要(英文)：The temperature recovery factor calculated from the measured wall pressure and nozzle wall temperature is found to be 0.835. Therefore, the value is used to diagnose the internal flows in this study. The stagnation temperature of the working gas was elevated by about 10 degrees by electric heating. The experimental results show that Mach number measured from the present method agrees well for $0 < x < 140\text{mm}$, where $x = 0$ is the throat position. However, for $x > 140\text{mm}$, Mach number measured from the present method is lower than that measured from the wall static pressure. This discrepancy will be attributed to the insufficient heating of the stagnation chamber.

研究分野：圧縮性流体力学

キーワード：圧縮性流体 超音速ノズル コールドスプレー

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

従来の流体計測法では、内部流れを測定するには管路を加工する必要がある。例えば、ガス速度をレーザー光を用いて測定するには、管路を加工して観測窓を設ける必要がある。ガス温度を測定するには、管路に穴を開けて熱電対などを挿入する必要がある。静圧を測定するには、管路に静圧孔を設ける必要がある。研究用または実験用の管路であれば、このような加工が可能である。しかし、加工が許されない実用管路、または微細過ぎるために加工が困難なマイクロ管路の場合、従来の流体計測法では流動状態が測定ができない。申請者は、圧縮性流れの静温度が速度に強く依存することに着目し、ノズル又は管路の外表面温度から内部流れの流動状態を診断する方法を考案した。本診断手法では、様々なノズル製品の性能を安価に検査することが可能であり、使用中の工業用管路も任意の場所で安価に流動診断が可能である。加えて、近年研究が進んでいるマイクロ流路の分野で特に威力を発揮する測定技術である。

2. 研究の目的

ノズル又は管路の外表面温度の測定法には赤外線カメラと熱電対がある。赤外線カメラカメラを用いた流体計測には、外部流れにおいて翼などの表面の境界層遷移や熱流束等の測定例がある（徳川、他 2 名、赤外線カメラを用いた低亜音速境界層遷移計測、NAL-SP-54, 2002）。しかし、密閉された管路の内部流れに対しては世界的に例がない。熱電対は安価であるが、内部流れの診断に用いられた例は見当たらない。

本研究は、気体の圧縮性内部流れを対象として、流路外壁のメタル温度と作動ガスの質量流量から、内部流れの静圧や速度の診断を可能にする技術を開発することを目的としている。圧縮性内部流れの具体的な流路としては、コールドスプレー用の超音速ノズルを想定する。

コールドスプレーは、ノズル内の不活性の超音速ガス流により直径 10 μm 前後の金属粉末を 500~1000m/s の高速で機械部品の表面に吹き付けてコーティングや肉盛りを行う技術である。コーティングの密着力や耐摩耗性を高めるには、一般に粒子速度を高める必要があることが知られている。そのため、作動ガスとして用いられる窒素ガスやヘリウムガス（1~3MPa, 常温~1000 $^{\circ}\text{C}$ 程度（燃焼ガスより cold））を超音速に加速させる必要がある。通常、金属粉末をコーティングするには一度溶かす必要があるが、コールドスプレーは固相のまま高速で吹き付けて成膜させることが可能である。そのため、熱劣化しやすいチタン合金の粉末などでも、ほとんど熱劣化させずに積層することができる。コールドスプレーは航空機（損耗した高価なチタン合金部品の補修）や、スパッタリングターゲットの肉盛り再生などで実用化が進みつつある。コールドスプレー用のノズルは、内径が数 mm 程度、長さが数十 mm~200mm 程度と細長いのが特徴である。小径かつ長尺のため、ノズルが設計通りに製作できているかどうかを確認する方法がない。設計通りのガス速度が得られるかどうかは研究室レベルであれば、ノズル出口のガス速度を PIV 等で測定すればよい。しかし、コールドスプレーノズルは使用中に微粒子により内面が摩耗し、その結果ガス速度が低下するため、施工中のガス速度をモニターする必要がある。しかし、そのために 1 セット数千万円もする PIV 測定器をノズルの個数分購入するのは現実的ではない。このような状況において、ノズルの外表面温度からノズル内の流動状態を診断することができれば、それは実用的な内部流動の診断法となる。

そこで、本研究ではコールドスプレーノズルを想定して、超音速ノズル内の圧力とマッ

ハ数をノズル外表面温度と作動ガスの質量流量から非接触で定量的に診断する方法を開発することを目的とする。

3. 研究の方法

一般に、0.2MPa 程度以上に加圧された高圧ガスをノズルを通して大気圧まで断熱膨張（加速）させると、ガス温度は 100K 程度又はそれよりも低下する。その結果、ノズル又は管路外表面のメタル温度も下がる。ガス速度が大きいほど、メタル温度は低下する。本診断法では、断熱状態であれば流路内壁に接する作動気体の温度（断熱回復温度） T_{aw} は、流路外壁のメタル温度に等しいという原理を用いる。断熱回復温度 T_{aw} は、温度回復係数 r を通して、次式により流路の断面平均マッハ数と関連づけることができる。

$$\frac{T_{aw}}{T_0} = 1 + r \frac{\gamma - 1}{2} M^2$$

ここで、 T_0 は流れの全温度、 M は流路の断面平均マッハ数、 γ は作動気体の比熱比である。断面平均マッハ数が得られれば、質量流量から静圧、静温度、速度を求めることができる。これが、本診断法の基本原理である。

本研究で用いた実験装置の模式図を図 1 に示す。作動気体は貯気圧力 1MPa 以下の条件では図 1 に示すように常温の乾燥空気、1MPa 超では窒素ガスである。超音速ノズルはステンレス製でスロート直径 1.8mm、出口直径 4mm、末広部長さ 180mm の円錐ノズルであり、末広部には直径 0.15mm の 10 個の静圧孔が内径のテーパに対して直角に設けてある。測定された静圧と作動ガスの質量流量からマッハ数を求めることができるが、これはノズルの外表面温度から得られるマッハ数の妥当性の検証データとして用いた。

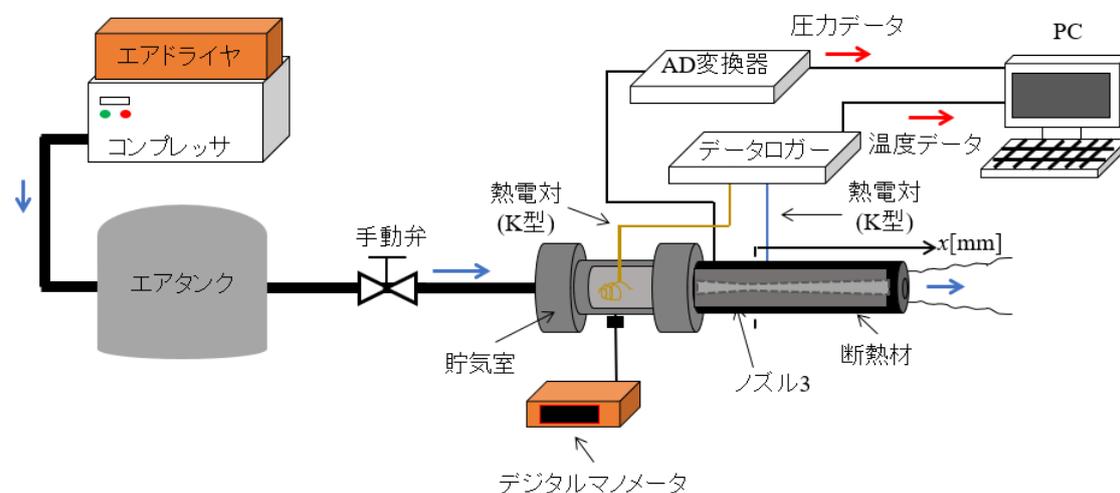


図 1 実験装置

4. 研究成果

令和 2 年度と 3 年度の研究により、ノズル出口の近傍において内部流れとは無関係のノズル外表面温度の上昇が発生することが分かった。本診断法はノズル内の流れが断熱であることを仮定しているが、ノズル外表面と外気との熱交換が内部流れの診断精度に無視できない程度の悪影響を与えることが分かった。外気との熱交換が発生した原因は、作動気体の全温度が大気温度であるため、ノズル内での断熱膨張により流れの温度とノズル外表面温度が大気温度よりも著しく低下したためである。そこで、ノズル全体をゴム系素材の断熱材で覆うとともに、貯気室をバンドヒーターで加熱してノズル出口近傍でノズル温度

が大気温度程度になるように全温度を高めることとした。

本診断法では、メタル温度から温度回復係数を通して内部流れの断面平均マッハ数などを求める。平板上の乱流境界層に対する温度回復係数 r は、プラントル数の $1/3$ 乗とされているため、本実験ではおよそ 0.89 である。しかし、 $r = 0.89$ としてメタル温度からマッハ数を求めたところ、検証用マッハ数からの差異が無視できないほど大きくなった。そこで、壁面静圧から求めたマッハ数とメタル温度から温度回復係数を逆算したところ、およそ 0.835 となった。そこで、本研究では $r = 0.835$ とした。

ノズル内の流れのマッハ数の測定結果の例を図 3 に示す。貯気圧力は 1.75MPa である。赤色の丸印は静圧から得られたマッハ数である。青色の四角印はバンドヒーターがない状態で本診断法により得られたマッハ数、緑色の菱形はバンドヒーターがある状態で本診断法により得られたマッハ数である。横軸はスロートを原点とする流れ方向距離である。図より、 $x=140\text{mm}$ までは本診断法によるマッハ数は、静圧から求めた検証用のマッハ数と比較的よく一致する。しかし、 $x > 140\text{mm}$ では、バンドヒーターの有無に関わらず検証用のマッハ数よりもかなり低い値を示す。これは、バンドヒーターによる貯気室の加熱が不十分であったため外気との熱交換が発生し、メタル温度が十分に下がらずに低めのマッハ数となったものと考えられる。

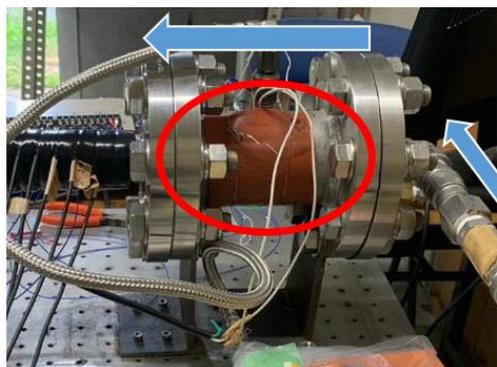


図 2 バンドヒーターを巻いた貯気室

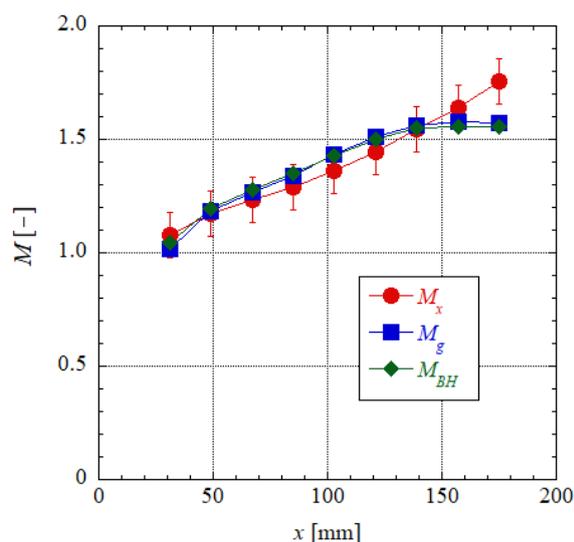


図 3 マッハ数の比較

本研究で得られた主な成果を以下に示す。

- (1) $r = 0.835$ としてメタル温度からマッハ数を求めた結果、 $x=140\text{mm}$ までは検証用マッハ数と比較的一致する。
- (2) $x > 140\text{mm}$ では、バンドヒーターの有無に関わらず本診断法で求めたマッハ数は検証用マッハ数よりも小さくなった。これは、バンドヒーターによる貯気室の加熱が不十分であったため大気とノズル出口端面の間の伝熱を遮断できなかったためであると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 片野田洋	4. 巻 59
2. 論文標題 高速フレーム溶射の最大粒子速度に関する粒径と粒子密度の普遍的な法則	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 溶射	6. 最初と最後の頁 33-38
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 -

1. 著者名 Hong Chungpyo, Katanoda Hiroshi, Asako Yutaka, Faghri Mohammad	4. 巻 202
2. 論文標題 Temperature recovery factor for gaseous nitrogen flow in a microtube	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 123688 - 123688
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123688	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 該当する

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 奥紘輔, 田中拓人, 片野田洋
2. 発表標題 外表面温度を用いた管内圧縮性流れの流動状態の推定に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会 2021年度 年次大会
4. 発表年 2021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
---------	---------