

令和 2 年 6 月 18 日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06165

研究課題名(和文) ノズルの外表面温度分布から圧縮性内部流れの速度・温度・圧力等を診断する手法の開発

研究課題名(英文) Development of Flow Diagnostics Method for Internal Compressible Flows Using Nozzle Outer-Wall Temperature

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) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：1)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、 $r = 0.89$ としてノズル温度からマッハ数を求めると、無視できないほどの誤差を生じる。
2)マッハ数 $1.0 \sim 1.5$ の範囲で温度回復係数を実験的に逆算した結果、およそ 0.845 となった。 $r = 0.845$ としてノズル温度からマッハ数を求めると、ノズル出口端近傍を除いて検証用マッハ数と比較的一致する。
3)ノズル出口端近傍では、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る。これは、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。

研究成果の学術的意義や社会的意義

内部流れの静圧や速度を測定する際、現在の測定法では静圧孔や観測窓を設置する必要があり、そのために流路を加工しなければならない。研究用の流路であればそれでよいが、加工が許されない実用管路、または物理的に加工が困難な微小径の管路内を流れる流体の圧力や速度を定量的に測定することはできず、またそのような測定技術は、現在存在しない。流路を加工する必要のない流体測定技術は、ノズル製品の検査、使用中の管路の流動診断、マイクロ流路内の流動診断などで有用である。
本研究により、ノズル外表面温度からノズル内流れの圧力やマッハ数を定量的に診断する方法について、技術的な見通しが得られた。

研究成果の概要(英文)：1) The temperature recovery factor r for the turbulent boundary layer on a flat plate is said to be Prandtl number to the power $1/3$. In the present research, therefore, r was set at 0.89 for the trial analysis. However, it resulted in unacceptable incoincidence against the validation Mach number.

2) The temperature recovery factor of the internal supersonic flow of the Mach number range $1.0-1.5$ is found to be almost $r=0.845$ for the present experimental conditions. It results in good agreement with the validation Mach number, except the region close to the nozzle exit.

3) Mach number obtained by the present method in the nozzle exit region is much smaller than the validation Mach number. This will be due to the heat transfer from the ambient air to the nozzle exit plane, destroying the assumption of the adiabatic flow.

研究分野：圧縮性流体力学

キーワード：流体力学 超音速流 ノズル

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、内部流れの静圧を測定する場合、流路に静圧孔を設ける必要がある。内部流れの流速を、熱線プローブを用いて測定する場合、熱線プローブを挿入する穴を流路に開ける必要がある。LDV (Laser Doppler Velocimetry) や PIV (Particle Image Velocimetry) で流速を測定するには、レーザー光を入射させるために流路にガラス窓を設けなければならない。すなわち、従来の流体計測法では、静圧や速度を測定するために流路を加工する必要がある。研究用の流路であればそれで問題ないが、加工が許されない実用管路、または物理的に加工が困難な微小径の管路内を流れる流体の圧力や速度を定量的に測定することはできず、またそのような測定技術は、現在は存在しない。流路を加工する必要のない流体測定技術は、ノズル製品の検査、使用中の管路の任意の場所での流動診断、マイクロ流路内の流動診断などで必要になると考えられる。

2. 研究の目的

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、非接触で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、超音速ノズル内のガス流により直径 $10\mu\text{m}$ 前後の金属粉末を $500\sim 1000\text{m/s}$ の高速で機械部品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 ($1\sim 3\text{MPa}$, 常温 ~ 1000 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。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 $\sim 200\text{mm}$ 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、そのためにコールドスプレーを使用する企業が 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 程度以上の高圧ガスをノズルを通して大気圧まで膨張 (加速) させると、作動気体の温度は 100K 程度、またはそれ以上下がる。その結果、ノズルの外表面のメタル温度も下がる。ガス速度が大きいほど、メタル温度の低下量も大きい。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と等しいという原理を用いる。作動気体の温度 T_{aw} は、温度回復係数 r を通して、流路の断面平均マッハ数と関連づけることができる。また、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。作動気体は常温の乾燥空気であり、最大圧力は 1MPa 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検証データとして用いた。

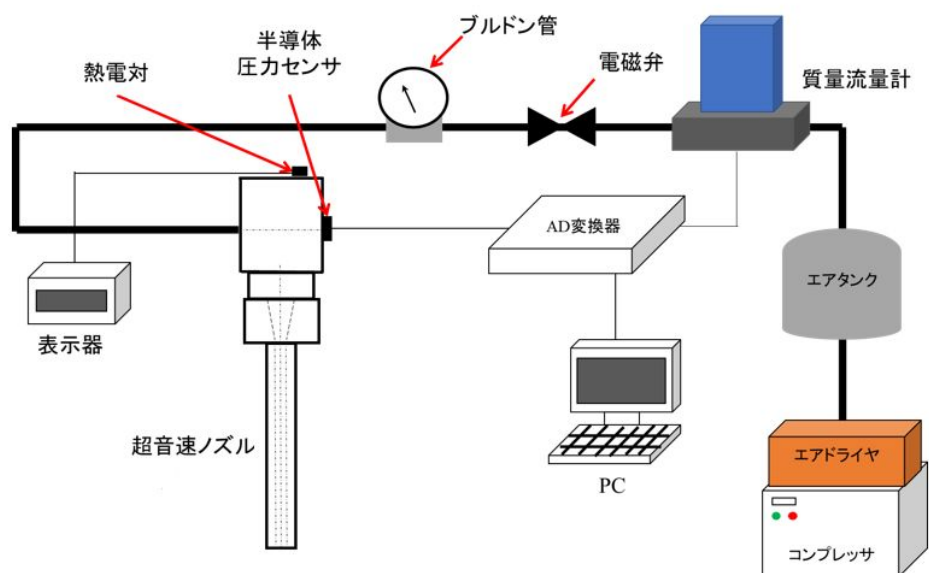


図 1 実験装置

4. 研究成果

作動中のノズルの外表面温度を赤外線カメラで撮影した例を図 2 に示す。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、赤外線カメラを用いる場合、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。そこで、ノズル外表面温度は熱電対で測定することとし、ノズル全体をゴム素材の断熱材で覆った。

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 1MPa である。赤色の○印は静圧から得られたマッハ数、青色の×印は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、 $x=157\text{mm}$ 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、ノズル出口に近い $x=174\text{mm}$ では、検証用のマッハ数よりもかなり低い値を示す。これは、ノズル出口端面の断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。

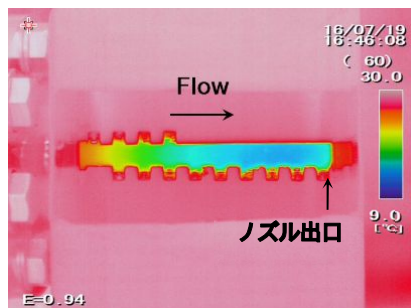


図2 作動中のノズルの熱画像

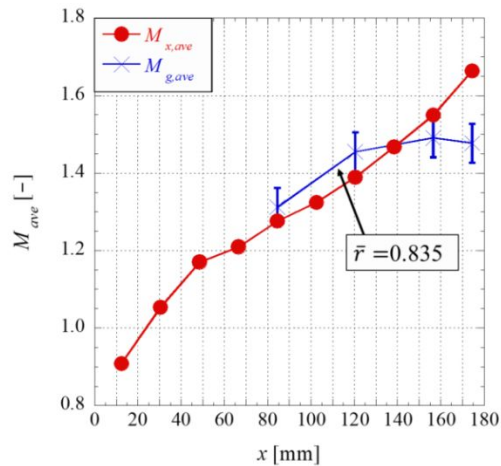


図3 マッハ数の比較

本研究で得られた主な成果を以下に示す。

- (1) 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ると、無視できないほどの検証用マッハ数からの差異を生じる。
- (2) マッハ数 $1.0 \sim 1.5$ の範囲で温度回復係数を逆算した結果、およそ 0.835 となった。 $r = 0.835$ としてメタル温度からマッハ数を求めた結果、ノズル出口端近傍を除いて検証用マッハ数と比較的一致する。
- (3) ノズル出口端近傍では、本診断法で求めたマッハ数は検証用マッハ数よりもかなり小さくなる。これは、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0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 前田公明, 河瀬颯真, 奥紘輔, 武憲汰, 片野田洋
2. 発表標題 外表面温度を用いるコールドスプレーノズルの内部流れの推定
3. 学会等名 日本機械学会第97期 流体工学部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 新穂尚利, 前田公明, 河瀬颯真, 片野田洋
2. 発表標題 赤外線カメラを用いるコールドスプレー用先細末広ノズルの内部流れの推定
3. 学会等名 日本機械学会九州支部北九州講演会
4. 発表年 2018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