

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 20 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560239

研究課題名(和文) マイクロチャンネルを流れるガス流の摩擦係数に関する研究

研究課題名(英文) Study on Friction Factor of Gaseous Flow in a Micro-channel

研究代表者

浅古 豊 (Asako, Yutaka)

首都大学東京・理工学研究科・教授

研究者番号：20094253

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ガス流の管摩擦係数を求めるのに必要な温度を他の物理量から間接的に求める方法についての理論的研究および温度測定実験を実施した。1) ガスの温度を圧力から算出する式を見出し、測定した圧力からガスの温度を算出できることを明らかにした。2) ガス流量と圧力を測定する実験を行い、ガス温度算出式から求めた温度を用いて摩擦係数を求めた。3) 内部に数枚のバッフル板を設けた全温測定筒を用いればマイクロチューブから流出するガス噴流の全温を測定できることを明らかにした。4) マイクロチューブから流出する噴流の蛍光強度から静温を求め、噴流が層流であれば数値解析結果とほぼ一致することを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：A theoretical study to derive a formula, which estimates the gas temperature from other physical value and experiments to measure the gas temperature which needs to obtain the friction factor of a gas flow in a micro-channel have been conducted. 1) The formula which estimates the gas temperature from the pressure was successively derived and the temperature is well estimated by using formula. 2) Measurements of the flow rate and the pressure of a gas flow in a micro-tube were conducted. The friction factors were obtained using the estimated temperature. 3) The total temperature of a jet from a micro-tube was measured by using a total temperature measuring device with several baffle plates. It is revealed that the total temperature can be measured by using the total temperature measuring device. 4) The static gas temperature of a jet was measured by using the Laser Induced Fluorescence and it is revealed that the static gas temperature of a laminar jet can be measured by the LIF.

研究分野：機械工学

キーワード：摩擦係数 ガス流 マイクロチャンネル

1. 研究開始当初の背景

流体がガスの場合、密度が圧力と温度によって変化するので摩擦係数を求めるには圧力と温度の二つを測定する必要がある。しかし、マイクロチャンネルのガス流の場合には流れが高速のことが多く、高速の流れの中に熱電対を挿入する方法では熱電対表面で運動エネルギーが熱に変わるため熱電対は全温と静温の間の温度を指し、温度を測定できない。そのため、チャンネル内の流れの熱伝達が良好なことから、等温流れを仮定し流量と圧力差とから摩擦係数は求められ、数値解析結果などの検証に供されている。しかし、マイクロチャンネルの出口近くでは加速により流体の温度が低下し、等温流れの仮定が成り立たない。マイクロチャンネル内のガス流の温度を他の物理量から間接的に求める方法の確立が求められている。

2. 研究の目的

ガス流の管摩擦係数を求めるのに必要な温度を他の物理量から間接的に求める方法を確立し、マイクロチューブの摩擦係数を求めることを目的とする。本研究では、(1)測定した圧力から温度を間接的に求めるガス温度算出式の導出。(2)ガス流量と圧力を測定し、ガス温度算出式から求めた温度を用いて摩擦係数を求める実験。(3)内部に数枚のバッフル板を設けた全温測定筒を用いたマイクロチューブから流出するガス噴流の全温測定実験。(4)マイクロチューブから流出する噴流の静温を蛍光強度から求める実験の4つを実施する。

3. 研究の方法

(1) ガス温度算出式の導出

圧力からガスの温度を間接的に求めるガス温度算出式を導出するため、壁面が断熱されたマイクロチャンネル内の一次元流れを考える。連続の式、理想気体の状態方程式、エネルギー式はそれぞれ、

$$\rho_{ave} u_{ave} = \rho_{in} u_{in} \quad (1)$$

$$\rho_{ave} = \frac{p_{ave}}{RT_{ave}} \quad (2)$$

$$C_p T_{ave} + \alpha \frac{u_{ave}^2}{2} = C_p T_{in} + \frac{u_{in}^2}{2} \quad (3)$$

ここに ρ_{ave} 、 u_{ave} 、 p_{ave} 、 T_{ave} は流路断面の平均密度、平均流速、平均圧力、平均温度で、 α は運動エネルギー補正係数である。式(1)、(2)を式(3)へ代入すると、 T_{ave} についての次式が得られる。

$$\alpha \frac{\rho_{in}^2 u_{in}^2 R^2}{2C_p p_{ave}^2} T_{ave}^2 + T_{ave} - \left(T_{in} + \frac{u_{in}^2}{2C_p} \right) = 0 \quad (4)$$

式(4)は T_{ave} についての二次式なので平均圧力 p_{ave} を式(4)へ代入し、式(4)を解けば平均温度 T_{ave} が得られる。

(2) ファニング摩擦係数測定実験

図1にファニング摩擦係数測定用の実験装置の構成を示す。ガス流量を流量計で測定し、よみ点温度および圧力を熱電対および圧力センサーで測定した。内径 $514.4 \mu\text{m}$ 、長さ $L=50 \text{ mm}$ 、内面の平均相対粗さ 0.04% の PEEK チューブに直径約 $200 \mu\text{m}$ の圧力タップ孔を $36.05, 41.05, 46.05 \text{ mm}$ の位置に3点あけ、圧力を測定した。

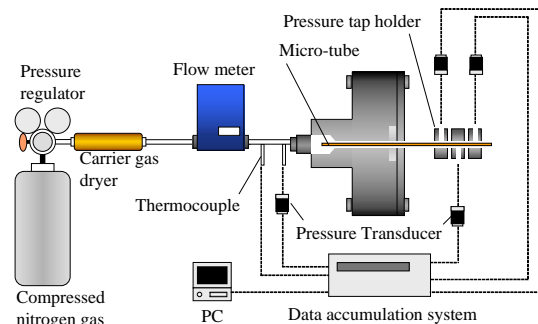


図1 ファニング摩擦係数測定実験装置

(3) 全温測定実験

図2にマイクロチューブから流出するガス噴流の全温を測定する全温測定筒を示す。内径 22 mm 、外径 72 mm のポリスチレン製の円筒の内部に、噴流の速度を十分に遅くするために6枚のバッフル板と熱電対を設け、噴流の温度を測定した。マイクロチューブは内径 $519.1 \mu\text{m}$ 、長さ $L=56.3 \text{ mm}$ 、平均相対粗さ 0.04% の PEEK チューブである。

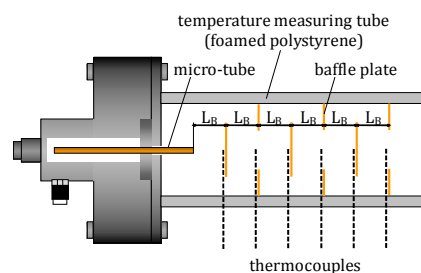


図2 全温測定筒

(4) 蛍光強度から静温を求める実験

図3にマイクロチューブから流出するガス噴流の静温をヨウ素の蛍光強度から求める一波長レーザー誘起蛍光法の実験装置の構成を示す。レーザーには波長 532 nm の広帯域発振半導体 Nd:YVO₄ レーザを用い、直径約 1 mm のビームをビームエキスパンダによって10倍に拡大し、それを凸円柱レンズで厚さ約 $130 \mu\text{m}$ 、幅 10 mm のシート光にしてヨウ素の励起に用いた。シート光に対して直角の方向から噴流の蛍光を冷却 CCD カメラ BS40C で

撮影した。マイクロチューブは内径 $149.4\mu\text{m}$ 、長さ $L=36.25\text{ mm}$ 、のシリカチューブ FS115 である。レーザが単一波長で広帯域発振、レーザ強度が飽和強度より十分に低く、圧力が大気圧程度の場合、ヨウ素の蛍光強度はヨウ素濃度、温度、圧力の関数となる。噴流の場合は圧力がほぼ大気圧で、ヨウ素の濃度を一定と仮定すれば蛍光強度 S_F は温度のみの関数となり、さらに蛍光強度が温度の指数関数で表されると仮定すれば

$$S_F = C^* \frac{f(T)}{\sqrt{T}} = C T^\kappa \quad (5)$$

参照位置の蛍光強度と温度をそれぞれ $S_{F\text{ref}}$ 、 T_{ref} とすれば、式(5)は

$$T = T_{\text{ref}} \left(\frac{S_F}{S_{F\text{ref}}} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \quad (6)$$

となる。参照位置は任意の位置で良く、参照蛍光強度、参照温度と蛍光強度から温度を求めることができる。

シート光強度の非一様性の補正を行うため静止した容器内にシート光を照射し、その蛍光からシート光強度を求め、シート光強度の非一様性の補正を行った。ついで、式(6)の指数 κ を求めるため、鉛直平板周りの自由対流場の蛍光強度を測定し、温度場の解析解と比較し $\kappa=7$ を得た。

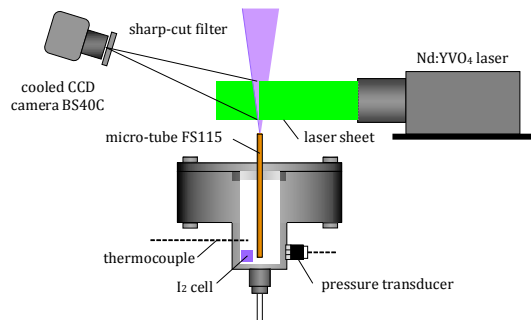


図3 蛍光強度から静温を求める実験装置

4. 研究成果

(1) ガス温度算出式の導出

図4は、内径 $400\mu\text{m}$ 、長さ 70 mm のマイクロチューブを窒素ガスが流れる場合の乱流数値シミュレーションによるガス温度(黒)と、数値シミュレーションによる圧力を式(4)に代入し、運動エネルギー補正係数 α を1として式(4)を解いて得られた温度(青)、さらに等温および等エントロピー変化と仮定した場合のガス温度である。式(4)から求めたガス温度と数値シミュレーションによるガス温度の一致は極めて良く、断面の平均圧力から断面の平均温度を求めることができることがわかった。

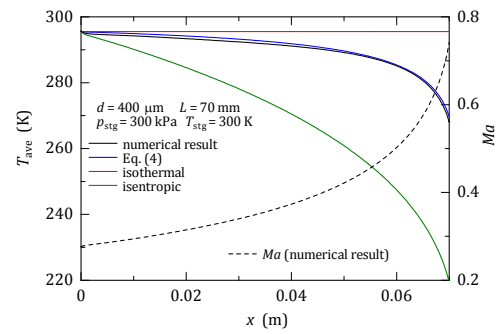


図4 断面平均温度 T_{ave} の比較

(2) ファニング摩擦係数測定実験

図5は、内径 $514.4\mu\text{m}$ 、長さ $L=50\text{ mm}$ のPEEKチューブの圧力タップ $x/L=0.721\sim 0.821$ 間のファニング摩擦係数(白丸)および $x/L=0.821\sim 0.921$ 間のファニング摩擦係数(赤丸)である。測定された摩擦係数の値はブラジウスのそれより約18%、数値シミュレーションの値より約15%高い値である。この差異は圧力タップの径がマイクロチューブの内径の約1/2と比較的大きいためと考えられ、今後、圧力タップ径の影響を調べる必要がある。

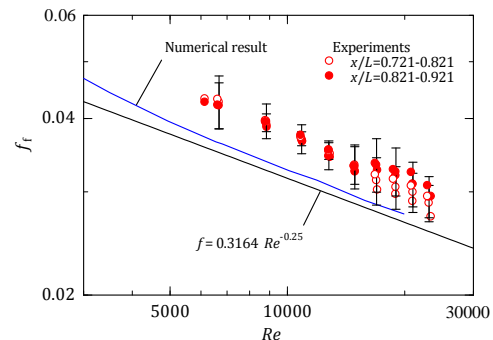


図5 ファニング摩擦係数

(3) 全温測定実験

図6は、内径 $519.1\mu\text{m}$ 、長さ $L=56.3\text{ mm}$ のPEEKチューブから流出する 8 L/min のガス噴流のバッフル板位置の温度をよどみ点温度との差で示したものである。噴流の温度は下流方向に向かって回復し、5番目のバッフル板位置では流速が十分に遅くなり、温度は全温と考えられる。

図7は5番目のバッフル板位置の全温とよどみ点温度との差を示したもので、バッフル板の間隔が5, 10, 20 mmの結果である。バッフル板の間隔が5~20 mmの範囲であればその影響はないことがわかる。また、図中の二本の実線は等エントロピー流れの仮定の下によどみ点圧力、温度、出口背圧から理論的に得られる噴流の全温である。測定された全温は理論値よりわずかに高いが、これはマイクロチュ

ープ内での熱伝達によるものであることが数値解析によって明らかになっており、本実験の全温測定筒を用いれば噴流の全温を測定できることがわかった。

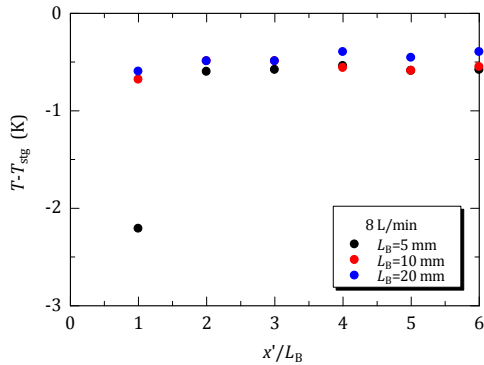


図6 バッフル板位置の噴流温度

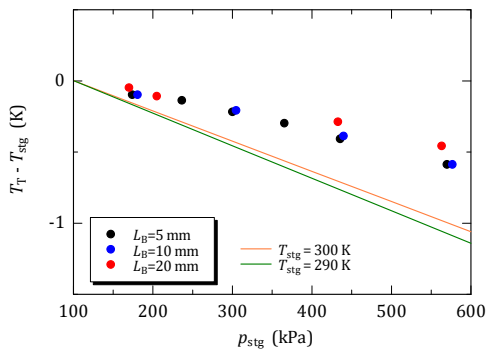


図7 噴流の全温

(4) 静温を蛍光強度から求める実験

図8は $p_{stg}=250$ kPa, $Re=1960$ の噴流の蛍光強度のコンター図で、シート光強度の非一様性を補正し、さらに0~10000に正規化したものである。この場合、流れはマイクロチューブ出口より4.1 mm下流の位置までは層流で、4.1 mm下流で乱流への遷移が始まる。乱流への遷移後の噴流の拡がり半角は通常サイズの噴流の拡がり半角とほぼ同じ11°である。

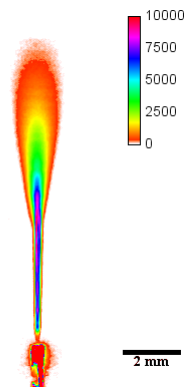


図8 蛍光強度 ($p_{stg}=250$ kPa, $Re=1960$)

図9, 10は、マイクロチューブ出口より3.2

mm下流位置の数値解析結果の温度を参照温度とし、その位置の蛍光強度を参照蛍光強度として、式(6)から求めた噴流の静温のコンター図および噴流の対称軸上の静温分布で、 $p_{stg}=250$ kPa, $Re=1960$ の結果である。これらから層流域であれば蛍光強度から求めた静温と数値計算結果とはほぼ一致し、蛍光強度から静温を求めることができることがわかった。一方、乱流へ遷移すると拡散によりヨウ素の濃度が低下するため蛍光強度が低下し温度が高く見積もられることがわかった。

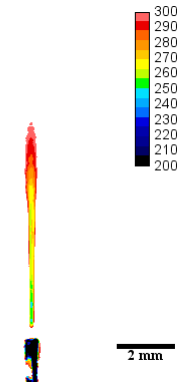


図9 静温 ($p_{stg}=250$ kPa, $Re=1960$)

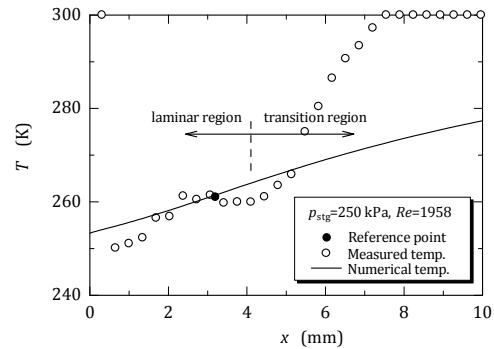


図10 静温 ($p_{stg}=250$ kPa, $Re=1960$)

以上をまとめると、

- 断面の平均圧力から断面の平均温度を求めることができる。
- 測定された摩擦係数の値はブラジウスのそれより約18%、数値シミュレーションの値より約15%高い値である。
- 内部にバッフルを設けた全温測定筒を用いれば噴流の全温を測定できる。
- 層流域であれば蛍光強度から静温を求めることができる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1件)

- ① D.Kawashima and Y.Asako, Data reduction of friction factor of compressible flow in

micro-channels, International Journal of Heat and Mass Transfer, 77, 2014-10, pp.257-261 査読有.

〔学会発表〕(計 6 件)

① M.Yamada, C.Hong and Y.Asako, Total temperature measurement of micro-gas jet, International mechanical engineering congress and exposition, 2014-11 (Montreal, Canada).

② Y.Asako, Fluid flow characteristics in micro-gas-jets, International conference on nano, micro and mini channels, 2014-8 (Chicago, U.S.A.).

③ D.Kawashima and Y.Asako, Measurement of Semi-Local Friction Factor of Gas Flow in Micro-Tube, International conference on nano, micro and mini channels, 2013-6 (Hokkaido University in Sapporo, Japan).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

浅古 豊 (ASAKO YUTAKA)

首都大学東京・理工学研究科・教授

研究者番号：20094253