

氏 名	あら き たく と 荒 木 拓 人
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	工 博 第 2263 号
学位授与の日付	平 成 15 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	工 学 研 究 科 機 械 工 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	マイクロスケール流路内の気体の熱流動特性

論文調査委員	(主 査) 教 授 鈴 木 健 二 郎	教 授 吉 田 英 生	教 授 小 寺 秀 俊
--------	------------------------	-------------	-------------

論 文 内 容 の 要 旨

マイクロスケール流路内の熱流動現象の解明は、磁気ディスク、MEMS（マイクロマシン）や Micro TAS、マイクロリアクターの開発・設計にとって重要である。本論文は、横断面寸法が数 μm から数百 μm の範囲の、市販のマイクロチューブやシリコン基盤上に製作した3角形および4角形断面を持つ寸法・幾何形状が特定可能な自家製のマイクロチャネルを使用して、すべり流域の窒素ガスとヘリウムガスの流れについて実験的ならびに理論的検討を行って、その成果を取りまとめたもので、7章からなっている。

第1章は緒言であって、この分野における従来の研究を概括し、本研究の目的と意義を明らかにしている。

第2章では、マイクロ放電加工法によるマイクロノズルの製作や異方性エッチング法によるマイクロチャネルの製作方法とその特徴、本研究で使用した実験装置と流量、圧力および温度の計測手法について述べている。第3章では、マイクロチャネル内のすべり流域気体流の熱流動現象を取り扱うために、流体の圧縮性と粘性消散の影響を考慮した連続体仮定に基づく数値解析法の概要を説明するとともに、固体壁面における境界条件について述べ、とくに、すべりを考慮するためのMaxwellの1次のすべり境界条件について述べている。

第4章では、まず円管内の非圧縮性流体等温流れならびに圧縮性流体等温流れに対して、摩擦係数や圧力勾配と質量流量の関係を解析的に導出し、それに対するすべりの影響について検討している。いっぽう、水力直径に比べて十分長い内径公称値が5, 15, 50, 100 μm の4種類の寸法の市販のマイクロチューブを使用し、窒素ガスとヘリウムガスを流体とする場合の実験を行い、得られた圧力損失や摩擦係数の測定値について検討を加えている。その結果、マイクロチューブ内の流れでは入口圧力と出口圧力の比が大きいため、流体の圧縮性が重要であること、したがって摩擦係数の値はマイクロチューブ入口と出口の圧力比に強く依存し、その値が1.1より大きくなる流量条件下では、摩擦係数に及ぼす流体の圧縮性の影響が無視できなくなること、摩擦係数の実測値のレイノルズ数依存性は圧縮性流体等温流れに対する摩擦係数のそれと定性的に良く一致するものの、定量的にはそれより小さめとなることを明らかにしている。しかし、この定量的差異が流れの希薄性に基づくものか否かについての詳細な議論は、市販のマイクロチューブではその真円性、寸法、滑らかさ等についての正確な計測が困難なことから、形状・寸法が正確に特定できるマイクロスケール流路を製作・使用する実験結果に基づいて行うべきことを述べている。

第5章では、前章の検討結果を受けてシリコン基盤上に製作した水力直径が3.9 μm から10.3 μm の範囲の3角形および4角形断面を持つマイクロチャネルの幾何形状や、これを流路として使用する場合の実験結果の誤差解析の結果を述べるとともに、これらの流路を使用した実験結果を解析結果と対比しつつ吟味している。その結果、前章と同様にマイクロチャネル内の流路内の流れでは入口圧力と出口圧力の比が大きいため、流体の圧縮性が重要であること、したがってその場合の摩擦係数は非圧縮性流体に対するその値の他に入口と出口の圧力比に強く依存すること、流路壁面における熱伝達率が極めて大きく、また流路構成材料と流体の熱伝導率比も大きいため、流路壁からの熱流入が不可避免的に生じて、流れの膨張加速に

伴う温度降下を抑制すること、その結果として、この流れが等温圧縮性流れとする取扱いで良好に近似できること、クヌッセン数が0.03以下のすべり流では、運動量適応係数を1程度とするMaxwellの1次のすべり境界条件が当てはまること、を明らかにしている。

第6章では、流路長が水力直径と同程度あるいはその10倍程度の比較的短いマイクロノズル内のすべり流域の気体流について数値解析を応用し、得られた結果について検討を行っている。その結果、この場合の入口出口圧力比を合理的に予測するには、貯気槽部やノズル入口部を含む全体系に対する数値解析が適すること、ノズル入口部では、流れの加速に対応する温度降下が、ノズル壁からの熱流入と壁近傍の大きな速度勾配に関連して生じる粘性消散に伴う温度上昇によって抑制されること、を明らかにしている。

第7章は結論であって、本研究の成果を要約している。

論文審査の結果の要旨

マイクロスケール流路内の熱流動現象の解明は、磁気ディスク、MEMS（マイクロマシン）やMicro TAS、マイクロリアクターの開発・設計にとって重要である。本論文は、横断面寸法が数 μm から数百 μm の範囲の、市販のマイクロチューブやシリコン基盤上に製作した3角形および4角形断面を持つ寸法・幾何形状が特定可能な自家製のマイクロチャネルを使用して、すべり流域の窒素ガスとヘリウムガスの流れについて実験的ならびに理論的検討を行って、その成果を取りまとめたもので、得られた主な研究成果は次のようである。

- (1) マイクロ流路内の気体流れでは入口圧力と出口圧力の比が大きいため、流体の圧縮性が重要であること、したがってその場合の摩擦係数は非圧縮性流れのそれぞれの流路に対する摩擦係数の値の他に、入口と出口の圧力比に強く依存する。
- (2) この流れでは、流路壁面における熱伝達率が極めて大きく、また流路構成材料と流体の熱伝導率の比も大きいため、流路壁からの熱流入が不可避免的に生じて、流れの膨張加速に伴う温度降下が抑制される。その結果、この流れは等温圧縮性流れとする取扱いで良好に近似できる。
- (3) クヌッセン数が0.03以下のすべり流には、運動量適応係数を1程度とするMaxwellの1次のすべり境界条件が適合する。
- (4) 流路長が水力直径と同程度あるいは、その10倍程度の比較的短いマイクロノズル内のすべり流域気体流れにおける入口出口圧力比を合理的に予測するには、ノズル入口部を含む全体系に対する数値解析が適する。この流れでは、ノズル入口部における流れの加速に対応する温度降下は、ノズル壁からの熱流入と壁近傍に存在する大きな速度勾配に起因する粘性消散に伴って生じる温度上昇によって抑制される。

以上、本論文は数種類の幾何形状を持つマイクロスケール流路を対象として、すべり流域気体流れの熱流動特性を検討し、新しい知見を提出したもので、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成15年2月26日、論文内容とそれに関連した試問を行なった結果、合格と認めた。