

京都大学	博士 (工学)	氏名	杉本 祥悟
論文題目	Numerical Analysis of Thermally Driven Rarefied Gas Flows inside Micro Devices (マイクロデバイス内部の温度駆動希薄気体流の数値解析)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は温度場によって誘起される希薄気体特有の流れを利用したマイクロデバイスポンプの作動原理と性能評価、そして壁面の適応係数の不均一性によって生じる一方向流れを利用した新しい作動原理のマイクロデバイスポンプの提案に関する研究をまとめたものである。マイクロデバイスポンプの性能の理論的予測は希薄気体の熱遷移流およびポアズイユ流の解析データを利用した簡便なものが一般的であるが、本論文ではボルツマン方程式の確率的な数値解法である DSMC 法 (剛体球分子) による数値解析によってマイクロデバイスポンプの作動原理の解明およびその性能の予測を行い、従来法の問題点を指摘している。さらに新しい原理のマイクロデバイスポンプに繋がるこれまで知られていなかった希薄気体流を数値解析によって見出している。本論文は4章からなっており、以下にその概要を述べる。</p> <p>第一章では温度場によって誘起される希薄気体特有の種々の流れ (熱遷移流, 熱ほふく流, 熱尖端流等) のメカニズム, これらの流れに関する過去の研究, そしてこれらの流れを利用した真空ポンプおよびマイクロデバイスポンプが概説されている。</p> <p>第二章では温度場によって誘起される希薄気体流を利用したポンプの作動原理に関する基礎的な研究が行われている。このような希薄気体流を利用したポンプは一般にクヌーセン型ポンプと呼ばれるが、ここでは作動原理が通常のクヌーセン型とは異なるタイプ (レイノルズ型) の存在が指摘されている。まずクヌーセン型ポンプの作動原理が以下のように説明されている。クヌーセン型ポンプとして、直径の異なる二種類のパイプを交互に接合し、これらの接合部が一つおきに加熱されるものを考える；加熱部周りでは管壁面の温度勾配の向きが逆転するが、これによって対向する二つ熱遷移流 (低温部から高温部に向かう) が生じ、これらの対向流の衝突によって加熱部周辺の圧力が上昇し、これより背向する二つのポアズイユ流 (高圧部から低圧部に向かう) が生じる；そしてこれら4つの流れの合成としてクヌーセン型ポンプを駆動する一方向流が生じる。続いてレイノルズ型ポンプの作動原理は以下のように説明されている。レイノルズ型ポンプは管の断面内に多孔膜を挿入したもので、多孔膜には管軸方向の温度勾配が付けられている；多孔膜の微細流路ではその温度勾配に応じて熱遷移流が生じるが、管の壁面に温度勾配が生じてもその影響はほとんど無視できる；多孔膜中の熱遷移流だけが生じるとすると、ポンプの性能指標の一つである最大流量は希薄度が高くなるにつれ際限なく増大するはずであるが、数値計算の結果はこれを否定する；数値計算では多孔膜に近接する領域で気体温度の急激な変化が確認され、これより多孔膜中で生じる流れとは逆向きの熱尖端流がそこで生じていることが結論される；熱遷移流とポアズイユ流に加え熱尖端流を合わせてポンプの駆動流が定まる。第二章ではその他に、レイノルズ型ポンプにおける希薄度、多孔膜モデルの形状および適応係数の影響が調べられている。また比較のためにクヌーセン型ポンプの計算も行われている。クヌーセン型ポンプの性能の予測には先に述べた熱遷移流とポアズイユ流の合成を仮定した簡便な方法が一般に使われているが、大きな誤差を生じる場合が示され、その理由として予測法的前提となる流れの一次元性が渦ロールの発生によって崩れていることが示されている。</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	杉本 祥悟
<p>第三章の内容は、An らによって近年製作された比較的複雑な形状のレイノルズ型マイクロデバイスポンプの DSMC 法による数値解析に関するものである。このポンプは多くの繰り返し構造からなり、その流れ場全体の解析はほとんど不可能であるが、本論文ではこれを周期構造とみなし、さらに対称性を利用することで計算領域を大幅に減らして数値解析を行っている。数値解析の結果は An らによって報告された実験結果（最大流量）と比較的よい一致を示している。</p> <p>第四章では温度場によって誘起される新しい希薄気体流が見出されている。異なる一様な温度に保たれた 2 枚の無限平行平板の適応係数が一方向に周期的に変動する場合に対し（二つの平板でその分布は同じ）、これら二平板間の希薄気体の振舞いが調べられている。これらの平板の適応係数の分布に位相差があると平板間の希薄気体は平均的に一方向に流れることが見出されている。位相差がない場合には渦ロールの列が生じる。壁面の適応係数の変化がその近傍の気体の温度に勾配を生じさせ、これによって誘起される熱ふく流が渦ロールを駆動していると論じられている。そして適応係数の分布に位相差があるとそれぞれの渦ロールは一方向に傾き、気体は平均的に一方向に流れることが示されている。適応係数の分布の波長と平板間距離の比、希薄度、そして平板の温度比がこの一方向流に及ぼす影響も調べられている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は近年急速に進展している MEMS 技術によって実現化が可能になったマイクロデバイスポンプの駆動原理および性能評価そして新しいマイクロデバイスポンプに繋がる希薄気流の発見に関するもので、温度場によって誘起される種々の希薄気体流が剛体球分子ボルツマン方程式に基づいて数値解析されている。そこで得られた主たる成果は以下の通りである。

1. 歴史的にはレイノルズ型ポンプはクヌーセン型ポンプよりも古いですが、その作動原理が明確でなかった故にクヌーセン型と同一視されてきた。ポンプを駆動する一方向流が熱遷移流とポアズイユ流の合成として理解されるクヌーセン型ポンプとは異なり、レイノルズ型では熱尖端流も駆動流の要素になっていることが本論文によって明らかにされた。この成果は学術的理解を深めるだけではなく、マイクロデバイスポンプの性能の従来の予測法の変更を要請するものである；レイノルズ型のマイクロデバイスポンプの性能評価にはクヌーセン型の予測法が実験結果に合うようにパラメータを調整して援用されている。本論文ではさらにクヌーセン型ポンプにおいても、従来の予測法が使えない場合があることが指摘されている。

2. 実際に製作されたマイクロデバイスポンプ内の希薄気体流を直接ボルツマン方程式に基づき数値解析することは過去に事例がなく、本論文の第三章で示された結果は先駆的なものである。数値解析に使われた確率的な解法である DSMC 法は主として宇宙機の大気圏再突入時などの高マッハ数の希薄気体流解析に用いられるものであるが、本論文が扱う微小マッハ数の解析では統計的ばらつきが災いして信頼性の保証が難しい。第三章の数値解析では周期性を仮定しさらに対称性を利用して計算領域を最小に絞った上で多数の粒子を用いた質の高い計算が行われており、その結果は信頼性の範囲と共に示されている。このように示された数値解析結果と実験値との比較的良好な一致は注目に値するが、これは実際の現象を定量的にも正しく数値的にシミュレートできたこと示しているわけではない。実験で用いられた気体は二原子分子の混合気体と見做される空気であるが、これを粘性係数から直径を定めた剛体球分子モデルによって正しく模倣できるとする一般的知見は確立しておらず、また計算で用いられたマックスウェル型境界条件が実現現象を定量的に正しく模倣できるという保証もない。しかしこれらの問題は現在の分子気体力学の課題であり、本論文の結果はその解決に向けての第一歩と位置付けられる。

3. 一方向流が系の対称性の破れとして現れることは特殊なことではない。しかし第四章で見出された新しい希薄気体流は学術的意義だけに留まらず、これを利用した新たなマイクロデバイスポンプの実現に繋がる結果として期待される。クヌーセン型ポンプやレイノルズ型ポンプは壁面の温度勾配を利用するが、その温度勾配を維持するには固体内部に常に熱の流れがなければならず、そのためには常時冷却部に熱が排出されていなければならない。第四章で見出された流れは壁面の温度勾配を必要としないことから、この流れを利用することでマイクロデバイスポンプのエネルギー効率の飛躍的な改善が見込める。今後の展開が期待される注目すべき成果である。

本論文は、MEMS 技術によって製作されるマイクロデバイスポンプの作動原理の理解とその性能評価および新しいマイクロデバイスポンプの提案に関わる希薄気体の挙動の定性的・定量的な研究に関するもので、学術上、実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、令和5年2月17日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。