

学位論文題名

マイクロマシン領域における
流体システムに関する基礎的研究

学位論文内容の要旨

近年、VLSI加工技術を転用し、シリコンウェハー上に、機械をサブミクロンの寸法で設計し、微小な機構部品を一体加工する手法が発表されて以来、マイクロメカニカルシステム(Micro Mechanical System、以下MMS)の研究が盛んに行われている。これまでに、静電型モータや歯車機構等、様々なアクチュエータや動力伝達機構が報告されているが、センサ類を除くと実用的なシステムは未だ開発されていない。これまで開発されてきたMMS、特にVLSI加工技術を応用したものは、平面的な構成に限られていて、任意の方向に動力を伝達することは困難であること、摩擦・摩耗によって寿命が短いことなどが指摘されている。現在、MMSの応用分野としては、医療や生物工学が最も期待されている。この場合、体内を含めた使用環境、使用目的を考慮すると、システムと流体との相互作用が重要な役割を果たすと考えられる。今までに流体を利用するマイクロシステムとして、微小流体回路が細胞操作等の分野で研究されているが、回路中の流体が示す力学的な特性に関しては詳しく調べられておらず、流体とその中の浮遊物を対象として詳細に研究することが必要であると思われる。また流体回路を動力伝達に用いると3次元的な構成が簡単な機構で実現できると期待でき、他分野での応用にも有用であると思われる。

本研究では、将来の医療分野でのMMSの基礎的研究とし、流体を利用したシステムを対象として、動力伝達に関する力学的特性の把握、長寿命が期待できる流体アクチュエータの開発、微小流体回路に適したシステム製作法の開発を目的としてマイクロシリンダでの圧力伝達特性や過渡応答特性の検討、磁性流体を外部磁場で駆動し、流体そのものを直接駆動する新しいアクチュエータの開発、マイクロ光造形装置を用いた微小流体回路の試作を行った。

本論文は次の7章によって構成されている。以下に各章についての概要を述べる。

第1章は研究の背景と目的であり、MMS研究の意義と本研究の目的について述べた。

第2章では、緒論で、これまでのMMSの研究動向を述べ、本研究の進展方向の指標と位置づけを行った。また、本論文と関連する流体力学理論について概説した。

第3章では流体を利用するMMSの基礎的研究として、毛細管を利用したマイクロシリンダシステムにおいて圧力-流速特性について検討した。内径70~600 μm の毛細管において様々な粘度のグリセリン水溶液を使用して流体の圧力-流速の関係を調べた結果、層流の条件下のハーゲン・ポアズイユ方程式によって計算された値と実験結果がよく一致することが示され、実験したサイズにおけるハーゲン・ポアズイユ方程式の有効性が確認された。次に、カンチレバーとPSDセンサによる光テコ原理を用いた微小力測定器を開発し、マイクロシリンダにおいての圧力伝達の特性を調べた。内径200,400,600 μm 、

長さ32mmの毛細管と直径150,330,550 μm 、長さ6mmのプランジャによって構成されたマイクロシリンダにおいて、加える圧力をゆっくりと増減したときに伝達された力を測定した。測定された力は、与えた圧力を毛細管断面積で換算した値以下であるが、プランジャ断面積で換算した値を上回っており、極端な圧力損失はなく、このシステムを利用したマイクロ流体圧システムの実用化の可能性が示唆された。

第4章は上記のマイクロシリンダにおける過渡応答を検討した。システムを板ばねを負荷とするシリンダとして単純化し、運動方程式を立てた数式モデルを構成してシミュレーションを行い、上記した微小力測定器を用いた実験結果との比較、検討を行った。モデルには、減衰項として平行2平板間の流れにおける移動平板に作用するせん断応力を用いている。実験においては作動流体の粘度、カンチレバーの固有振動数、毛細管の長さをパラメータとして変化させた。この系は流体の粘性抵抗による粘性減衰系であって、減衰比をパラメータとしてまとめた結果、実験データとシミュレーションは減衰比 $\zeta=0.05$ 以上の場合、精度よくシミュレート出来た。また、力を受ける対象物(カンチレバー)の固有振動数の違いによって、過渡応答波形が依存するという結果が得られ、MMSを設計する際には、アクチュエータが動作する対象を十分に考慮する必要があることが示された。これらのことから、減衰比 $\zeta=0.05$ 以上の場合のマイクロシリンダシステムにおいてはマクロサイズの流体力学の方程式を用いて設計が可能であることが示唆された。

第5章は流体そのものを直接駆動する、新しいマイクロアクチュエータとして、外部からの磁場により磁性流体を駆動する方式を考案した。ギャップを持つ環状鉄心ソレノイドを製作し、そのギャップ間に磁性流体を入れた毛細管を置いてアクチュエータを構成した。本構成では、ダイヤフラムなどの可動部を必要としないため可動部の疲労による破壊などが極力抑えられ、寿命の長いアクチュエータが開発できると期待できる。ソレノイドのギャップの磁場等をパラメータとして、発生可能な磁気圧について検討し、マイクロ磁性流体アクチュエータの実現可能性について検討した。内径70~400 μm の毛細管を使用し、直流磁場を加えた場合、毛細管の一端に静的な圧力をかけたときに磁場によって毛細管内の磁性流体を保持できる磁気圧と磁場の強さは、ほぼ線形関係を示し、理論式での計算値と比較すると約1.3倍の値が得られた。また、2組の磁性流体とソレノイドで構成した、模擬マイクロアクチュエータを用いて、ソレノイドに流れる電流を交互にON/OFFすることによって、磁性流体を往復運動させた際に生ずる動的な磁気圧を検討した結果、毛細管の内径が70~200 μm の場合、静的条件で得られた磁気圧の80%以上で、毛細管の内径が70 μm の場合、磁場440kA/mで約100mmHgの磁気圧が得られており、往復型のマイクロアクチュエータの可能性が示唆された。

第6章では、マイクロ加工用光造形装置の試作とマイクロ構造物の製作について述べる。3次元的な力伝達を行う要素を製作するには完全な3次元的な加工手段が必要である。光造形法は、CADによって作られた目的形状の断面データさえあれば、自由曲面や中空形状など従来の加工法では作ることが困難であった形状も実体化することができるという特徴を持ち、マイクロシステム加工用として活用する試みがなされている。試作したマイクロ光造形装置は平面(X-Y平面)で約5 μm 、深さ(Z方向)で数十 μm の加工精度が得られており、深さ方向の加工精度の改善により、マイクロ加工法としての利用可能性は充分であると思われる。また、試作したマイクロ光造形装置を用いて微小流体回路を試作し、応用の可能性を確認した。マイクロアクチュエータの製作のみならず、細胞操作等、様々なMMSの製作に適用可能であることが示唆された。これまでのマイクロ加工装置と比べ簡単な装置でマイクロ加工が可能であり、試行錯誤の多いMMS研究の手頃な加工手段として有効であると考えられる。

第7章は本論文の結論であり、本研究で得られた結論を総括して述べ、結びとした。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 勇 田 敏 夫

副 査 教 授 山 本 克 之

副 査 教 授 狩 野 猛

副 査 教 授 池 田 正 幸

学 位 論 文 題 名

マイクロマシン領域における 流体システムに関する基礎的研究

近年、マイクロメカニカルシステムが盛んに研究されているが、センサ類を除いて具体的なアプリケーションが検討された例は殆ど無い。このような状況で、実用化が最も期待されているのが医用工学の分野であり、手術用内視鏡の先端の可動部など、サブミリオーダーの機構の適用が見込まれている。

本論文はこのような背景のもとに、マイクロ流体システム、特に従来検討例の無い液体を媒体とするシステムの、サブミリオーダーにおける実用可能性を探ることを目的としており、流体システムの基本機構であるマイクロシリンダにおいての力伝達特性、ダイヤフラムなどの機構を必要とせず、非接触で駆動するため長寿命が期待できる磁性流体マイクロアクチュエータの検討、サブミリ程度の管路などの製作に適した光造形装置の試作等のシステム構成・製作の全般にわたる検討をまとめたものである。本論文は第7章で構成され、各章についての概要を述べる。

第1章は、研究の背景と目的であり、流体を使用するマイクロメカニカルシステム研究の意義と本研究の目的について述べている。

第2章に、緒論として、これまでのマイクロメカニカルシステムの研究例についてマイクロ理工学、マイクロアクチュエータ、マイクロ加工法の各分野毎に研究の現況と問題点を概説し、本研究の位置づけを示している。

第3章では、サブミリオーダーの機構を対象とし、マイクロ流体システムの基本機構であるマイクロシリンダシステムの特性を調べた結果について述べている。動力伝達時の圧力損失ならびにステップ入力時の過渡応答について、毛細管を使用したシリンダによる実験とマイクロシリンダの数式モデルのシミュレーション

によって検討し、マイクロレベルにおける流体圧システム実現可能性を確認した上、設計に有用な数式モデルを得ている。

第4章では、機構部品を必要とせず、流体そのものを直接駆動する、新しいマイクロアクチュエータとして、外部からの磁場により磁性流体を駆動する磁性流体マイクロアクチュエータを提案した。基礎的データとして、環状ソレノイドと毛細管を使用したシステムにおいて、加えた磁場と得られる圧力の関係を調べ、アクチュエータとしての実用可能性を検討し、毛細管の内径が $70\mu\text{m}$ の場合、磁場の強さ 480kA/m で 100mmHg 位の動磁気圧が得られていることから、人の血管内でのアプリケーションが動作が可能であることを明らかにしている。

第5章では、マイクロ流体システムの製作を目標とする加工法としてマイクロ光造形法を検討している。マイクロ光造形装置を試作し、加工精度の等の基礎データを収集し、三次元の流体回路の製作可能性を検討している。試作したマイクロ光造形装置では平面(X-Y平面)で約 $5\mu\text{m}$ 、深さ(Z方向)で数十 μm の加工精度が得られており、マイクロメカニカルシステムの加工機としての微小流体回路への利用可能性を示唆している。

第6章では、医療におけるマイクロメカニカルシステムの応用例として、マイクログリッパ、能動屈曲型内視鏡、インジェクションポンプを想定し、本研究で検討してきたサブミリオーダのマイクロシリンダと磁性流体アクチュエータを用いて仮設計を行い、適用の可能性を検討している。

第7章は、本論文の結論であり、本研究で得られた結論を総括して述べている。

これを要するに、著者は、マイクロメカニカルシステムの医療応用を実現する手段としてサブミリオーダのマイクロ流体システムの実現を目指して、その可能性を明らかにし、将来の医療用マイクロマシンの開発上有益な新知見を得ており、生体工学ならびに医用精密工学に寄与するところ大である。

よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。