

光造形法を用いたマイクロアクチュエータに関する研究

竹村, 直樹 / TAKEMURA, Naoki

(発行年 / Year)

2005-03-24

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2005-03-24

(学位名 / Degree Name)

修士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

2004 年度

指導教授 田中 豊 教授

光造形法を用いたマイクロアクチュエータ
に関する研究

Design and Fabrication of Micro-Actuator by Stereolithography

大学院工学研究科
機械工学専攻修士課程

竹村 直樹

目次

第1章 緒論	4
1.1 背景	4
1.2 MEMSの成果と課題.....	5
1.3 目的	7
第2章 一体造形マイクロアクチュエータ	8
2.1 流体マイクロアクチュエータ	8
2.2 システムの概要	10
2.3 光造形	11
2.3.1 原理.....	12
2.3.2 特徴.....	14
2.3.3 問題点.....	15
2.3.4 Viper si ² SLA System.....	16
2.3.5 用途と例	17
第3章 機能性流体	19
3.1 概要	19
3.2 電界共役流体	20
3.3 ECFポンプモジュール	21
3.4 計測実験装置	22
3.5 実験結果（ECFポンプ）	24
3.6 多段式ECFポンプ	25
3.7 実験結果（多段式ECFポンプ）	26
第4章 ダイアフラム型アクチュエータ	27
4.2 ダイアフラム特性実験	29
4.3 静特性	30
4.4 動特性	31
4.5 ECF駆動ダイアフラム	34
4.6 動作実験	36
第5章 結論	37
謝辞.....	38
参考文献.....	39
付録.....	40

図表一覧

Fig.1 Micro gear mechanism

Fig.2 MEMS

(a)Opt MEMS

(b)Bio MEMS

Fig.3 3D Molding

Fig.4 Principle of Stereolithography

Fig.5 Pull-up method

Fig.6 Viper si² SLA System

Fig.7 Example of Stereolithography

Fig.8 ECF jet

Fig.9 ECF pump

Fig.10 Experimental setup for ECF pump

Fig.11 Photograph of experimental setup

Fig.12 Relation between applied voltage and output pressure in the ECF pump

Fig.13 Multistage ECF pump

Fig.14 Photograph of Multistage ECF pump

Fig.15 Relation between applied voltage and output pressure in the Multistage ECF pump

Fig.16 Layer stack technique for the Diaphragm

Fig.17 Diaphragm

Fig.18 System configuration

Fig.19 Static characteristics for the diaphragm

Fig.20 Dynamic characteristics for the diaphragm

Fig.21 Dynamic characteristics for the solenoid valve

Fig.22 Pressure and displacement graph

Fig.23 Diaphragm actuator powered by ECF

Fig.24 Photograph of the diaphragm actuator powered by ECF

Fig.25 Pilot study for the diaphragm actuator powered by ECF

Fig.26 Laser displacement gauge

Fig.27 High voltage DC generator

Fig.28 Micro electric discharge machine

第 1 章 緒論

1.1 背景

1987 年，アメリカ合衆国の AT&T ベル研究所が半導体微細加工技術を用いてウェーハ上に 3 連式マイクロ歯車の研究成果を発表した(Fig.1). 歯車の直径は大きいもので $185\mu\text{m}$ ，小さいもので $125\mu\text{m}$. 動力源は持たず，空気の吹き付けによって回転するだけの歯車ではあったが，世界中に強い衝撃を与えた．これに触発される形で，1980 年代の後半より半導体製造技術を応用した，微細環境（マイクロ世界）に特化した研究が急速に世界各国で注目され始めた．その後，アメリカでは MEMS(Micro Electro Mechanical System)，日本ではマイクロマシンと名で様々な研究がなされ，上述した歯車の発展型であるマイクロ静電モータなどは初期の MEMS を表すシンボルとなった．

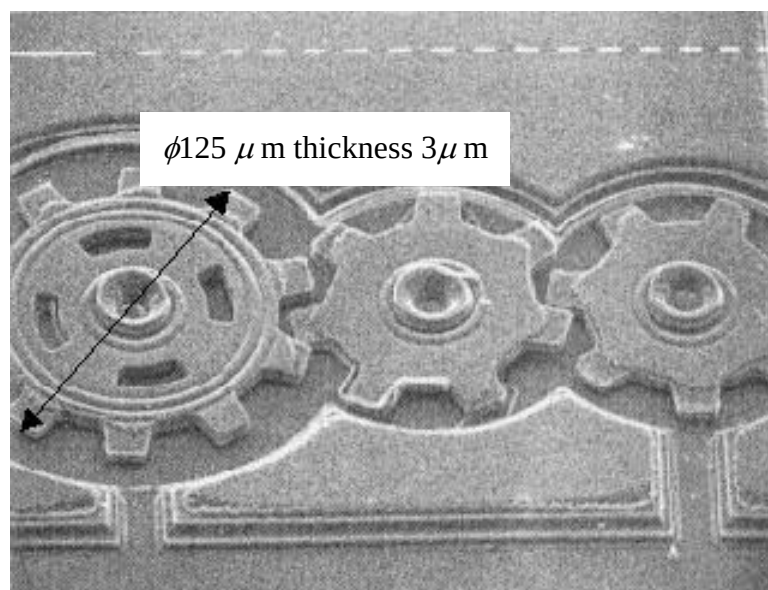


Fig.1 Micro gear mechanism

1.2 MEMS の成果と課題

日本においてはマイクロマシンという言葉が広く使われていたが、現在国際的には MEMS という名称で統一されつつある。先に述べたように MEMS は Micro Electro Mechanical System の略であり、直訳すれば微小電気機械システムということになる。MEMS の言葉がアメリカ発祥であるように、この技術は半導体産業の副産物といえるものであり、半導体加工技術を利用したマイクロ構造によるものの研究が主体となっている。

その大きさは、全体寸法を指すこともあれば、その中の重要機構の代表寸法を指すこともあるが、多くはサブミリからサブミクロン ($100\sim 0.1\mu\text{m}$) 程度である。それらの多くがシリコンウェハ、またはそこに成膜したものから必要なパターンを浮き出させる除去加工によって作製されている。

近年の MEMS の中で実用化された例として、1 辺 $10\mu\text{m}$ 程度の微小な鏡を 100 万個程度並べて、個々を静電気で傾斜させ、全体として動画を映し出すディスプレイが有名である。また、応用として、化学・医療用検査デバイスの小型化という分野が注目されている。これらをマイクロ TAS (μ -Total Analysis Systems) と呼び、マイクロの世界において、少量のサンプルと試薬を用いて高速・高精度に分析を行うことができる事に着目した分野である。

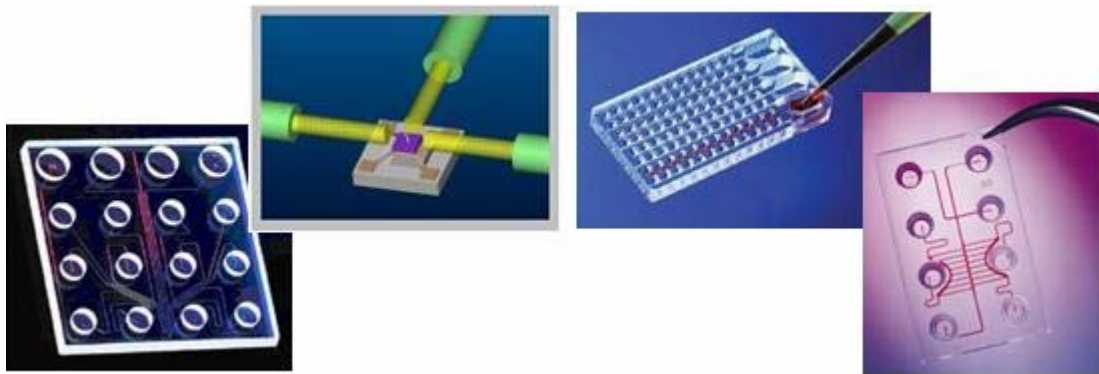
以上のように、光路の切り替えを行うマイクロメカニズムの開発や、DNA チップの製造技術や新しい DNA チップの方式の開発など、MEMS の有力（あるいは実用化に近い）な応用分野は光学 (Opt MEMS) とバイオテクノロジー (Bio MEMS) であると考えられている。

このように、マイクロテクノロジーに関する研究開発が活発に行われるようになって 20 年近く経過し、多くの研究者や研究予算が当てられている分野ではあるが、当初期待されたようには実用化が進んでいないと言える。

その一因として、上述した MEMS の研究開発において、シリコンウェハを対象とする半導体の製造技術が最も利用されてきたが、応用という観点からは複雑な立体構造を加工しづらいなど、必ずしも最適な製造技術とは言えない場合

があり、また、材料としてもシリコンが適さないことも多いことが挙げられる。

また、MEMS の研究の出発点が具体的なニーズによるものではなく、シーズの開発から始まったことにも起因する。しかし現在の製造業では、マイクロの操作に強いニーズが存在する。つまりシーズの開発と新技術の提案から、それらの技術を活かし、具体的なニーズに対応する段階に入ったといえる。



(a)Opt MEMS

(b)Bio MEMS

Fig.2 MEMS

1.3 目的

現在マイクロ・ナノテクノロジーに関する研究は「情報・通信」,「自動車・民生」,「製造・検査」,「医学・バイオ」など,より広い分野のシーズとして研究のみならず多くのニーズを生む技術となりつつある. また,これらは既存製品の微小化という観点のみならず,むしろマイクロ世界の特性を生かした新たな概念を用いたデバイスの開発に大いに期待が寄せられている¹⁾.

しかし,半導体デバイスに比べ,マイクロメカトロニクスにおける各種要素の集積・統合はあまり進んでいないと言える. またシリコン以外の材料へのニーズも高まってきている. 本研究では各種要素を光造形法による一体造形にて製作することで,困難とされる組み立て工程を簡略化し,各要素を集積・統合,小型化・高機能化を目指している. またアクチュエータの駆動源には,小形化の優位性が指摘されているフルードパワーを用いる. 本報はマイクロアクチュエータに向けた,一体造形型ダイアフラムと多段式 ECF ポンプの開発について報告する.

第2章 一体造形マイクロアクチュエータ

2.1 流体マイクロアクチュエータ

マイクロアクチュエータを開発する際に大きなネックとなるのが相似則（スケール効果）による問題点である．たとえば流体アクチュエータの大半は，シリンダやベーンモータのように固定部と可動部の間にパッキンなどを用いてシーリングを保ちながら動作する容積型のアクチュエータである．しかしこの構造をそのままマイクロ化すると表面力が支配的となるマイクロ世界においては，摺動摩擦の影響が増大し，良好な動作が得られなくなる．

これに対し，ゴム材料で内部に密閉空間（圧力室と呼ばれる）を形成し，この圧力室の圧力調整によるゴムの弾性変形を利用したアクチュエータが従来よりいくつか開発されている^{2),3)}．このようなゴムの弾性変形を利用した流体アクチュエータは，一般に以下のようなマイクロ化に適した面を有している．

- 1) 構造が簡単で，小型化が比較的容易である．
- 2) 摺動部を持たず，摩擦の影響を受けにくい．
- 3) 力／自重比が，マイクロ化に伴い上昇する．

その反面，マイクロ化に伴う以下のマイナス面も有している．

- 1) 流体圧源と流体を送るチューブが必要である．そのため，ワイヤレスの狭隘作業マイクロロボットや携帯用機器への応用は難しい．
- 2) チューブや流の細径化に伴い，流体の摩擦抵抗が大きくなり，アクチュエータの応答性が低下する．
- 3) 固体アクチュエータ（圧電素子，形状記憶合金等）や，静電アクチュエータに比べると，立体的な構造の部品が必要で，高度なマイクロ化を行う場合には囲うが難しくなる．

以上のことから、マイクロ化に有用とされる流体アクチュエータであるが、いくつかの問題点があることが分かる。

このような問題点を解決する手段として、本研究では一体造形型マイクロアクチュエータを提案する。

2.2 システムの概要

本研究で提案する一体型マイクロアクチュエータの概要について説明する．上述したように容積型の流体アクチュエータはマイクロ化に優れた特性を持っているが，いくつかの問題点も有している．本研究ではその問題点について，光造形法を用いた一体造形によって解決を目指している．

後（2.3 光造形）に説明するが，光造形法を用いることで複雑な立体構造を用意に作製することが可能となる．これにより，困難とされていた流体アクチュエータの立体構造の造形が容易になる．またアクチュエータ部，流路部などをすべて一体造形によって造形することで，複雑な流路走査，アクチュエータの設置場所の自由度の向上などが可能となる．

また，流体圧源として機能性流体（第 3 章）を用いることで，外部に動力源をおき，チューブなどで接続する必要が無く，システム内部に動力源を埋め込むことが可能となる．

2.3 光造形

CAD データを実体化して立体模型として取り出す手法として、コンピュータ制御による積層造形法（Rapid Prototyping）が近年実用化された。光造形法（Stereolithography）はその代表で、この分野で最も実績がある。Fig.3 のように光造形法は複雑な立体模型を、内部形状も含めて一回のプロセスで自動的に作製でき、機械加工に関する知識・経験が不要であることが特長である。材料が光硬化性樹脂に限定されるが、最近ではセラミックや金属の製品を作製する手法についても研究開発が進んでいる。

また、光造形法の他にも紙積層法（Sheet Lamination）、熔融物積層法（Fused Deposition）、粉末焼結法（Laser Sintering）、粉末接着法などがある。



Fig.3 3D Molding

2.3.1 原理

Fig.4 に光造形法の原理を示す．まず，CAD データなどの数値モデルを高さ方向に等間隔の水平面で Fig.1 に光造形法の原理を示す．まず 3DCAD データなどの数値モデルを高さ方向に等間隔の水平で数学的に切断し，スライス図形データ群を作成する．次にその下端のスライス図形データを取り出し，その形状に従って液状の光硬化性樹脂の表面を紫外線レーザーで走査して，光硬化反応により硬化層を形成する．一層の硬化層を形成した後，切断厚みに等しい厚さの未硬化樹脂層をその上に重ね，次のスライス図形についての露光・硬化を行う．この時レーザー光の照射エネルギーを制御することにより，第一層目と第二層目とを化学的に反応結合層を形成して硬化させながら接着させる．第二層目の照射エネルギーは第二層目を積層厚み分だけ硬化させるためのエネルギーより若干大きくする．すると，この第二層と第一層の間は化学的な反応により強固に接着し，均質な硬化層（反応結合層）が積層される．これをモデルの上端に達するまで繰り返し，全体が一体化したプラスチックの立体模型が造形される．

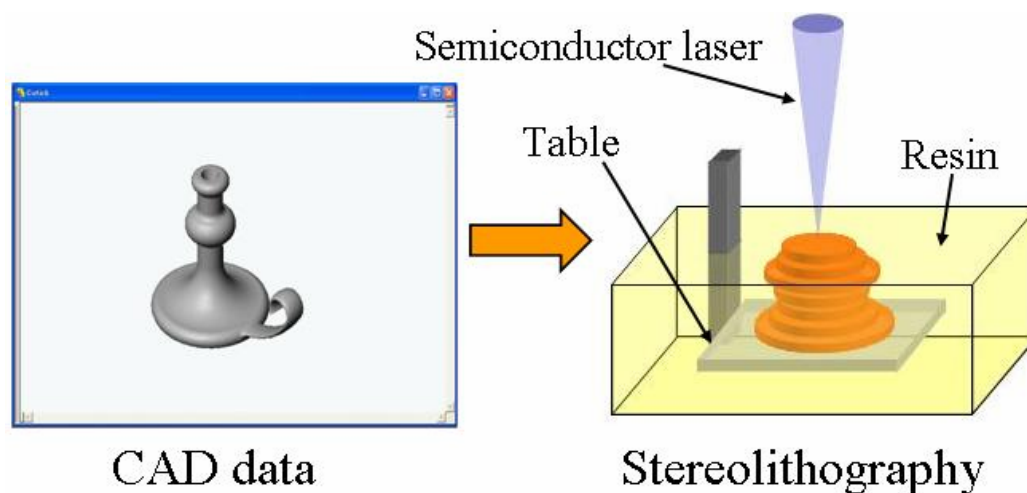


Fig.4 Principle of Stereolithography

また，樹脂硬化層の一層は極めて薄くすれば高精度の成形を行うことができ，比較的厚くすれば高速(短時間)で成形を行うことができる．テーブルより大きなモデルの場合は分割して造形し，最終硬化の前につなぎ合わせることで一体も

のを製作することができる。

光硬化性樹脂は、光重合性プレポリマー（オリゴマー）および光硬化開始剤を主成分とする混合液体である。オリゴマーにはウレタンアクリレートやエポキシなどの種類があり、光硬化したプラスチックの剛性、耐熱性などの物理的・機械的特性を決定付ける。最近では硬化反応の完全で後露光工程が不要なこと、硬化収縮率の低く変形しにくいこと、低粘度で扱いやすいことなどの理由で、カチオン重合型（エポキシ）樹脂に切り替わりつつある。

光造形における方式の違いに硬化層の形成場所によるものがある。Fig. は自由液面法と称して樹脂タンクの上から樹脂液面に露光を行っている。一方、規制液面法と称する方法では、Fig.5 のように樹脂タンクの底面を透明窓とし、その外から露光を行い、固化層を透明窓から引き剥がして硬化層と透明窓の間に次の樹脂液の層を形成して次層の露光を行う。

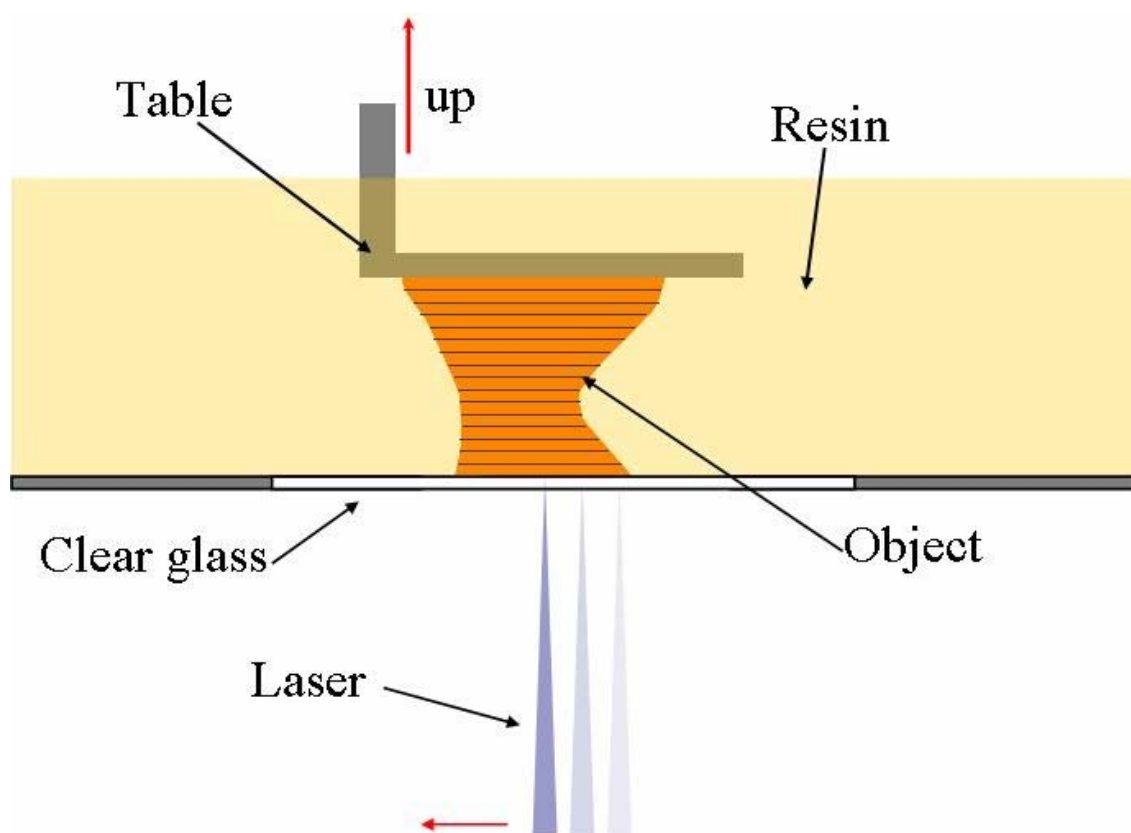


Fig.5 Pull-up method

2.3.2 特徴

光造形法による立体物製作法は，従来の加工法に比べて以下のような特徴がある．

- 1) NC 工作機では加工不可能な自由局面や複雑な内部構造でも 1 工程で簡単に製作可能．
- 2) 加工技術や加工装置に関する専門知識や熟練が比較的必要的ない．
- 3) 完全な自動化運転であり，無人の夜間運転が可能．
- 4) NC 工作機のような取り付け治具の準備が不要．
- 5) 工具を用いないため，工具管理が不要．
- 6) 騒音，振動がなく，事務室環境への持ち込みが可能．
- 7) レーザ光の集束系よりも小さい，微小サイズの固化形状が得られる．

2.3.3 問題点

様々な利点のある光造形法だが、依然いくつかの問題点を抱えている。以下に示す。

- 1) 樹脂の硬化の際に収縮が発生し、精度を決める要因となっている。
- 2) 近年低価格化が進んできたが、装置が非常に高価である。またレーザ、樹脂、メンテナンスを含めたランニングコストも少なくない。
- 3) 光硬化性樹脂の開発が進んでいるものの、引張り強度、曲げ強度、衝撃力の強さなど、機械特性、温度特性などの物性が悪い。
- 4) 造形自体は簡単なものの、造形後の洗浄などに熟練が必要とされる。

1) の問題は収縮に起因する内部応力による形状による歪みである。積層して行くために絶えず硬化物には偏りが生じる。このことが造形物の歪みの原因となっている。抜本的な解決ではないが、スキャンパターンを工夫することによりかなりのレベルまでこの歪みを改善することができる。2)、3) については現在開発が活発に行われており、その結果により解決が示されることを望む。

2.3.4 Viper si² SLA System

本研究ではマイクロ光造型機（3DSystems Corp.社製Viper Si² SLA System）を使用した．Fig. に示す．



Fig.6 Viper si² SLA System

仕様

- ・ 光硬化用レーザー：Nd:YVO4 半導体レーザー（100mW）
- ・ 最小積層ピッチ：50 μ m
- ・ ビーム径：250 μ m（標準），75 μ m（高解像度）
- ・ テーブル垂直解像度：2.5 μ m
- ・ 造形速度：最高 500 μ m/s
- ・ 造形サイズ：最大 125mm×125mm×250mm

2.3.5 用途と例

本研究では光造形法により実部品そのものを製作することを目的としている。ここでは、光造形法の通常利用されている用途とその例（Fig.7）を簡単に紹介する⁴⁾。

1) 意匠設計におけるデザイン評価（形状確認）

デザイナーが設計した製品のデザインを評価する際に光造形が用いられている。造形モデルを作ることで、デザインが期待したものであるかなど実際に手にとって、設計者自身が確認・検討を行え、また第 3 者の評価も受けやすい。また従来の機械加工などと異なり、簡易に造形できるため設計修正などフィードバックが可能であり、よりスピーディで的確な製品開発が可能となる。

2) マスターモデル

3DCAD でデザイン・設計したモデルを 10 数個直ちに入手したいときなどにはウレタン樹脂やエポキシ樹脂などの熱硬化性樹脂を用いるレプリカの製作が行われている。このときのマスターモデルとして光造形で作成したモデルが有効に利用できる。

2) 機能評価

設計の確認を行うための、部品の組付や嵌合のチェックに利用したり、機構やシミュレーション実験などの機能的な検討を行うことにより、設計ミスを防いだり、より適切な設計が可能となる。光造形法を用いることで、CAD 上での設計直後に極めて短時間で立体モデルを作製でき、検討結果を製造設計に容易にフィードバックできる。

4) 医療分野

医療分野でも光造形法が利用されている。CT スキャンで得られた断層データをもとに患部のモデルを作成し、難しい手術の際の手術方法の検討、削除部分

の検討，手術手順のシミュレーションなどに利用することが普及している．保険認定されれば，高度な医療行為のためにさらに利用が進むものと考えられる．また，人工骨などのモデルとしてハイドロキシアパタイトを含む感光性樹脂の検討も，米国の大学を中心に進められておりこの分野の発展も今後期待される．

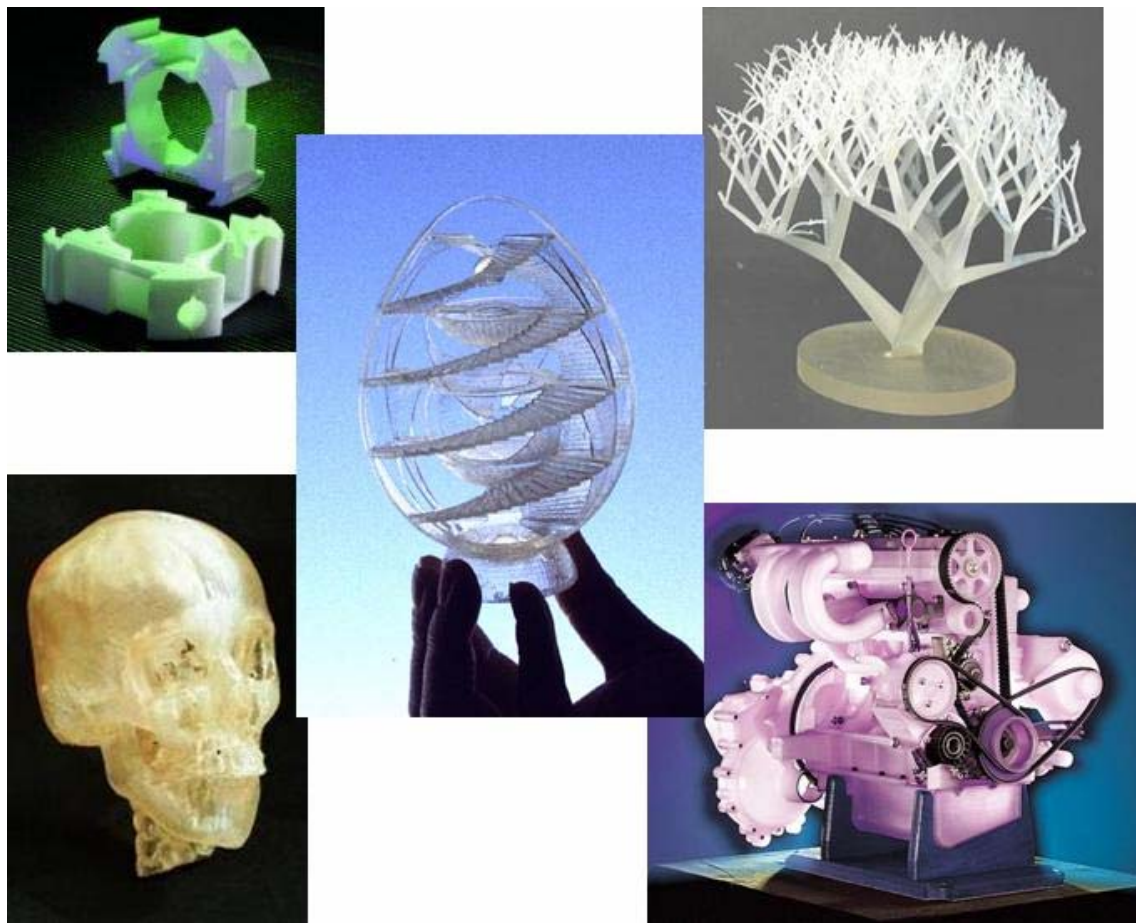


Fig.7 Example of Stereolithography

第3章 機能性流体

3.1 概要

機能性流体とは、液体の周囲の電界や磁界により、その物理的性質を変化させる流体の総称である。中でも代表的なものに流体のレオロジー（例えば粘度）の変化を生じるERF（電気粘性流体）やMRF（磁気粘性流体）などがある^{5),6)}。機能性流体をマイクロ流体制御のアクチュエータに応用する利点としては、機構がシンプルになること、また弁体としてのスプールやポペットなどの可動部をなくす事が出来て、マイクロ化することにより問題となる表面での固体摩擦を下げる事が可能であり、加工精度や摺動部などの隙間制御を問題にしなくて済むことがあげられ、機能性流体のマイクロ化への応用が有利であると考えられる⁷⁾。

3.2 電界共役流体

電界共役流体 (ECF: Electro-Conjugate Fluid) とは、ある種の誘電性液体であり、Fig.8 のように液体中に挿入した電極間に直流の高電圧を印加することにより、正極から負極にむけジェット流を発生する機能性流体である⁸⁾。

この流体の発生する原理は十分に解明されていないが、イオンドラッグ⁹⁾が一因ではないかと考えられている。すなわち、流体分子は陽極付近でプラス電荷に帯電し、陰極に引き寄せられ、それに伴い両電極間で対流が生じるものと考えられる。また、この流動は平行平板が作るような均一な電場では発生せず、電位勾配が急激かつ不均一な電界において発生する事が確認されている。

この ECF を駆動源とすることにより、システム内部に流体駆動源を埋め込むことが可能である。また、バルブなどを用いないため、可動部を持たない構造が可能となる。ECF は、流体を駆動源とするマイクロアクチュエータにおいて非常に有用である。

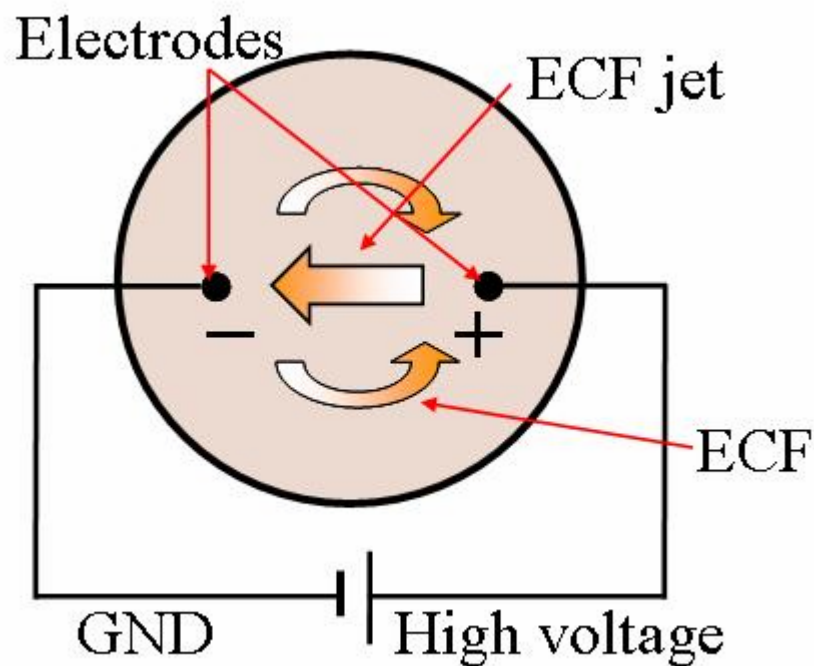


Fig.8 ECF jet

3.3 ECF ポンプモジュール

予備実験として、ECF ジェットを用いた線状電極対による ECF ポンプモジュールを試作した。Fig.9 に示す。光造形機にて管径 2mm の流路を造形し、あらかじめ開けておいた横穴に線状電極を差し込み、シリコン樹脂を注入し密閉した。試用した線状電極は直径が 0.1mm で、電極間を 0.5mm とした。また、使用した ECF はデカン二酸ジブチル (DBD) である。

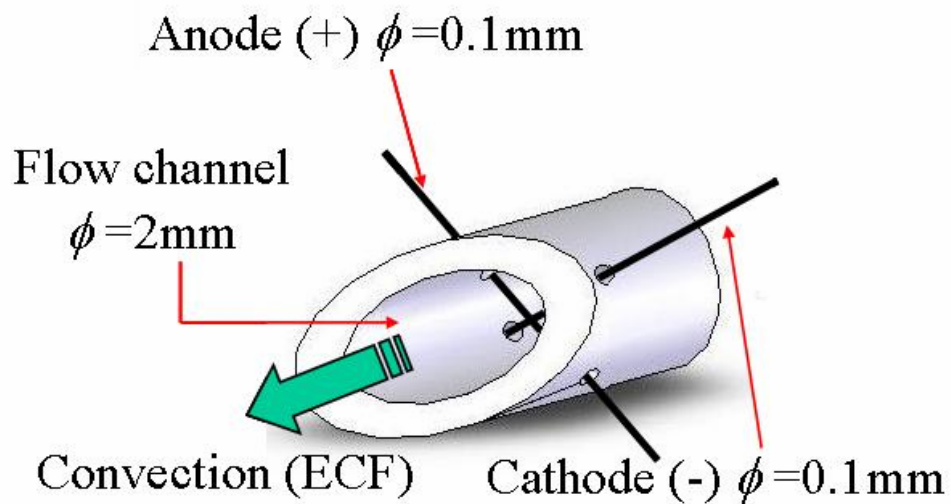


Fig.9 ECF pump

3.4 計測実験装置

試作した ECF ポンプモジュールの出力差圧を測定するために Fig.10 のようなマノメータを試作した．圧力損失などの影響が少ないようマノメータに直接ポンプモジュールを埋め込む構造とした．

出力差圧とマノメータの液柱高さの関係は，

$$p = \rho gh \quad (1)$$

である． p は出力圧力， ρ はDBDの密度 ($0.94 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$)， g は重力加速度， h は液柱高さである． Fig.11 に実験風景を示す．

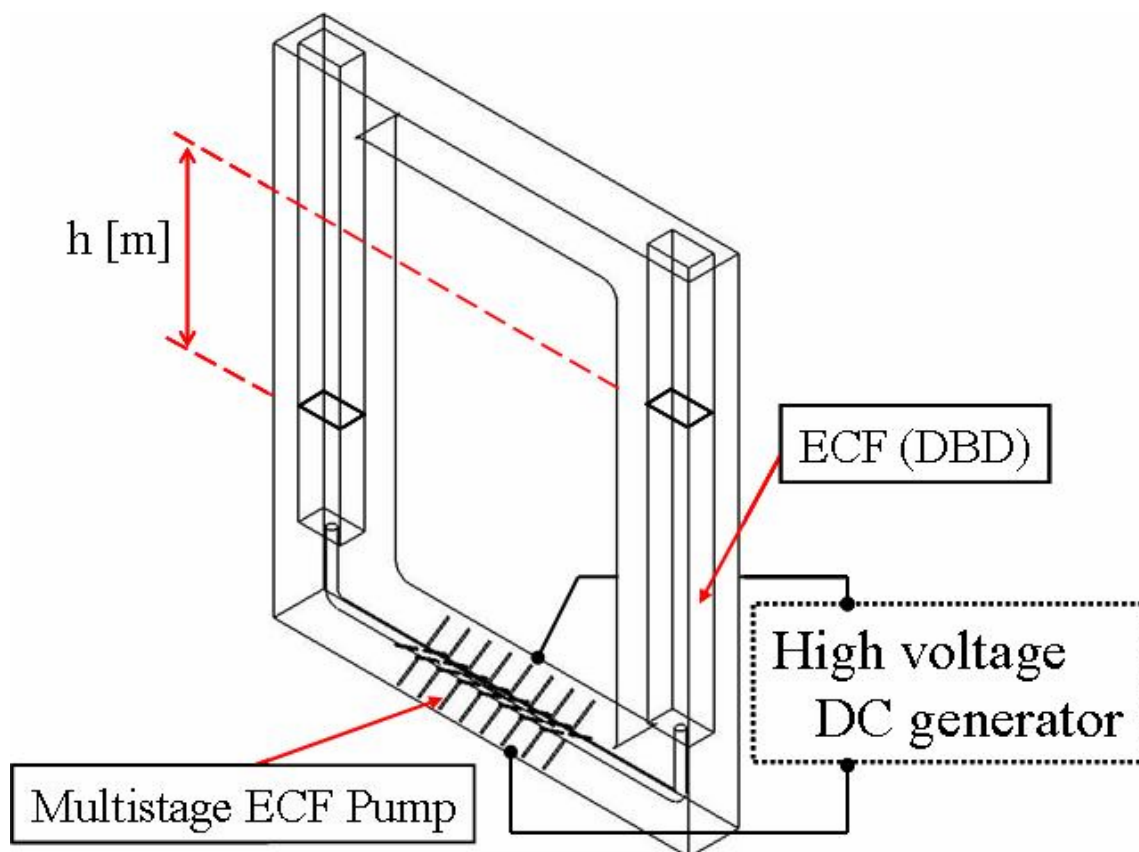


Fig.10 Experimental setup for ECF pump

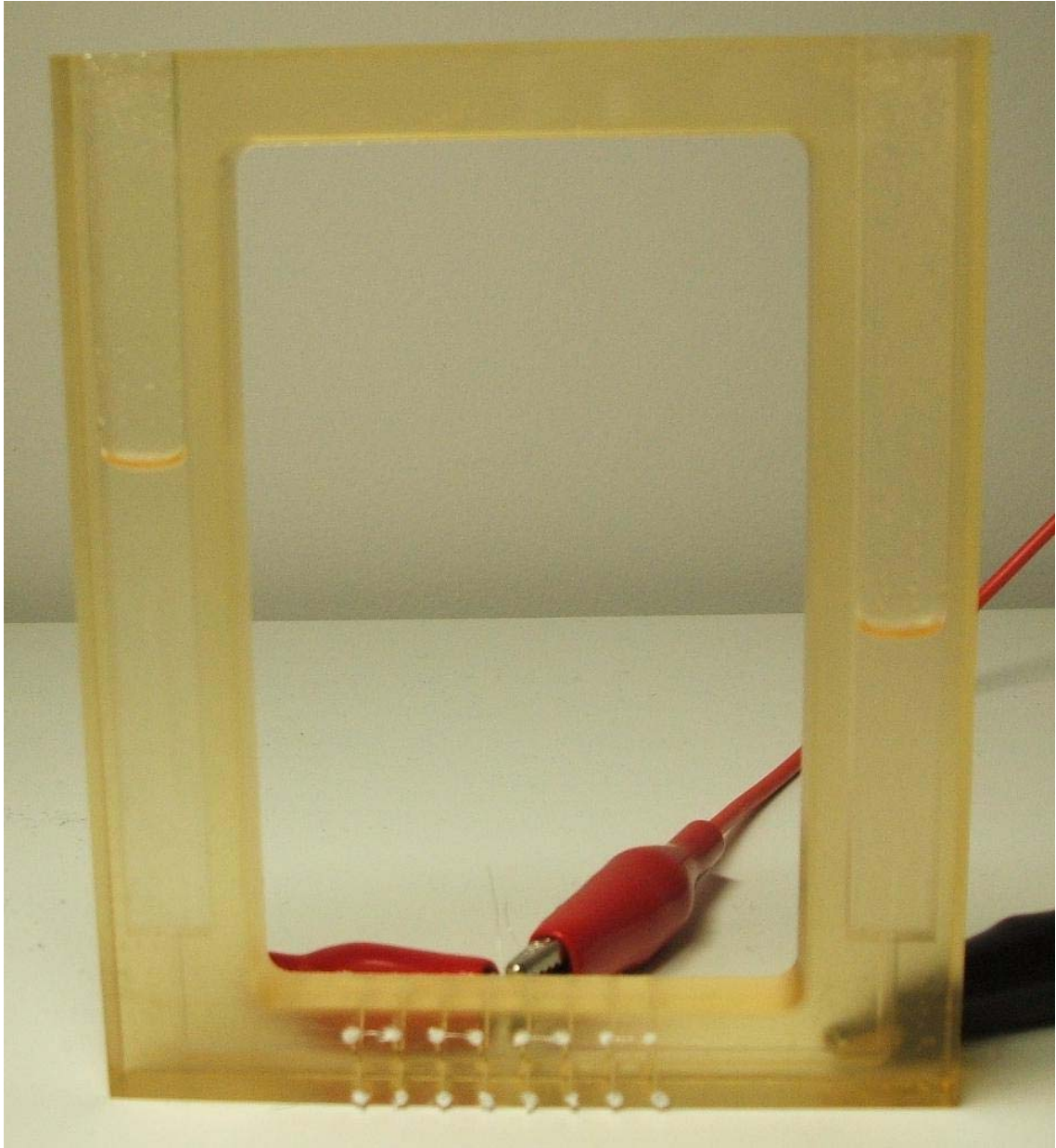


Fig.11 Photograph of experimental setup

3.5 実験結果 (ECF ポンプ)

出力差圧測定実験の結果を Fig.12 に示す．出力は安定し，ヒステリシスも少ない．また印加電圧を増幅させることで，2 次曲線状に出力が増大しているのが分かる．しかし入力電圧 5kV で 120Pa の出力と，発生出力が十分得ることが出来なかった．

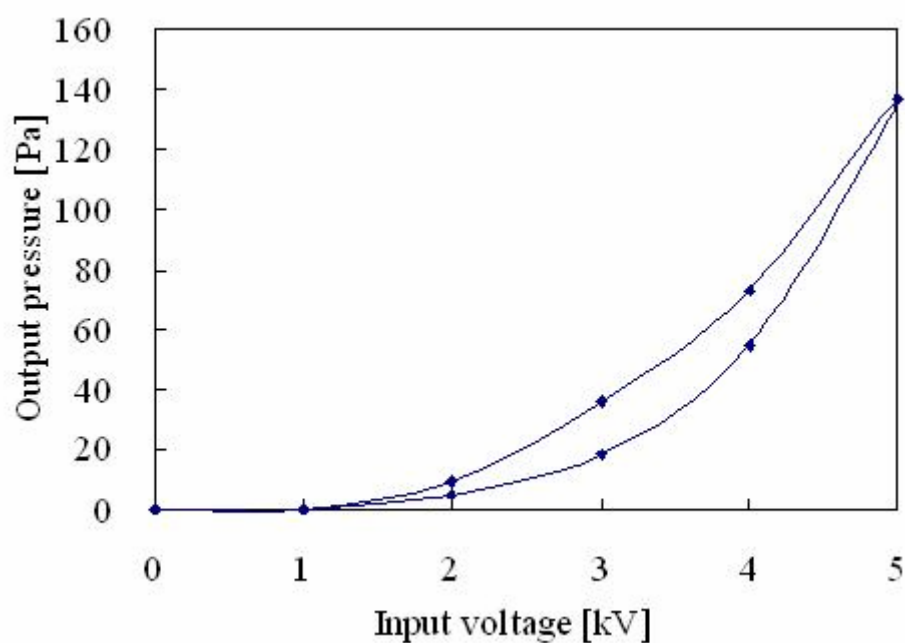


Fig.12 Relation between applied voltage and output pressure in the ECF pump

3.6 多段式 ECF ポンプ

上述した ECF ポンプの出力が十分なものでなかったため、電極対を直列に並べる事で多段増幅型のポンプモジュールを試作した。4mm の間隔で同電極対を直列に並べていき、6 段式ポンプとした。

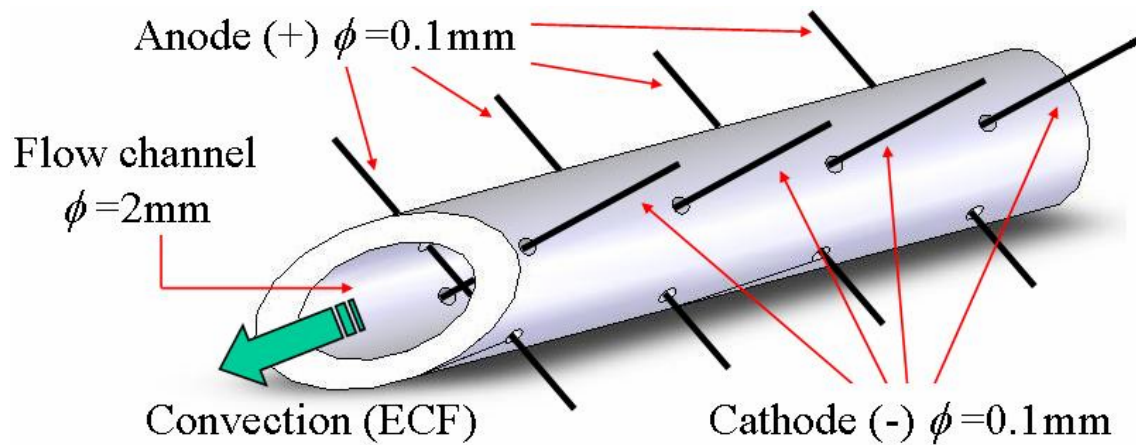


Fig.13 Multistage ECF pump

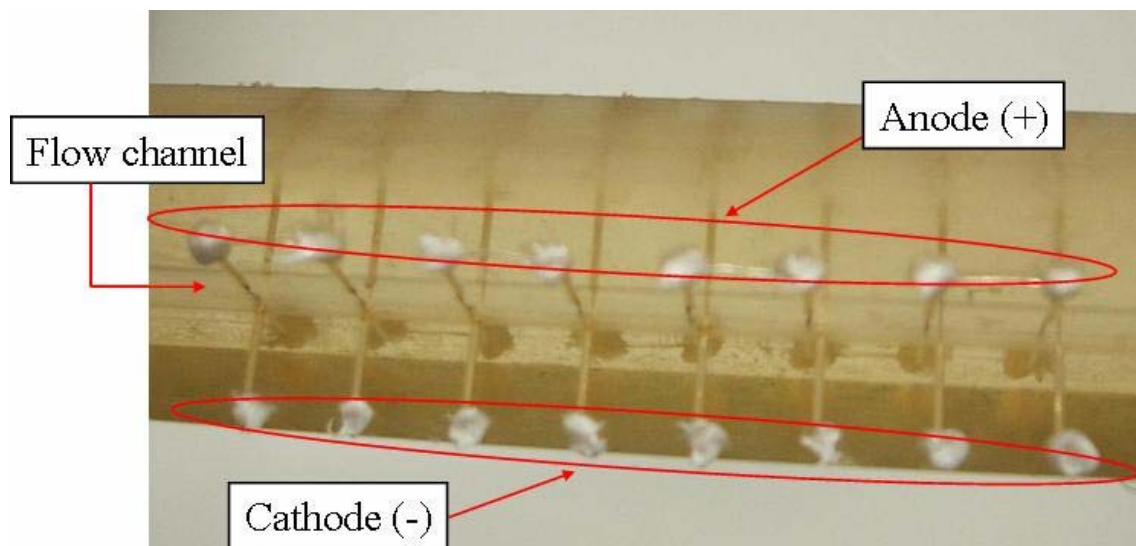


Fig.14 Photograph of Multistage ECF pump

3.7 実験結果（多段式 ECF ポンプ）

多段式 ECF ポンプモジュールを用いて、出力圧力測定実験を行った。実験装置は上述したマノメータによるものである。印加電圧を 0kV から 5kV に上昇させ、その後 5kV から 0kV に下降させた。また電圧印加する電極対を 1 つずつ増やし、その際の出力圧力を測定した。Fig.15 に実験結果を示す。図に見られるように電圧印加する電極対の数を増やすことにより、出力圧力も増加し、多段式とすることにより十分な出力が得られることがわかる。

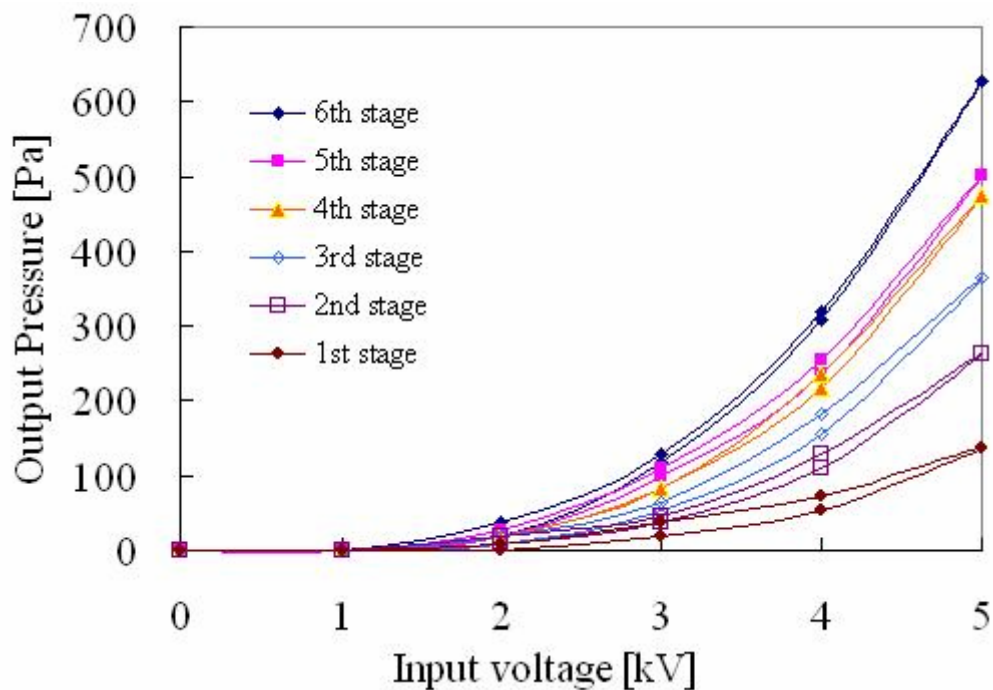


Fig.15 Relation between applied voltage and output pressure
in the Multistage ECF pump

第4章 ダイアフラム型アクチュエータ

先に述べたように、可動部が無く、材料変形を用いた流体アクチュエータはマイクロ化に有効である。本研究では光造形法を用いダイアフラム型のアクチュエータを試作、その特性を検討した。

4.1 試作モデル

今回光造形機を用いてダイアフラム型アクチュエータを試作した。ダイアフラムの形状は円形、直径 5mm、膜の厚みは 0.1mm である。ダイアフラムを造形する際、問題となったのが薄膜部分の造形である。薄膜部分に垂直な形で積層すると、薄膜に支えが無く、またリコータ（液面を均すためのブレード）に接近する面が大きくなってしまうため薄く像気することが出来ない。Fig.16 のようにダイアフラム薄膜の水平方向を光造形機の縦方向とすることで 0.1mm 薄膜を積み上げていき、現状で最も薄い 0.1mm 薄膜を造形することが出来る。造形したダイアフラムについて Fig.17 に示す。

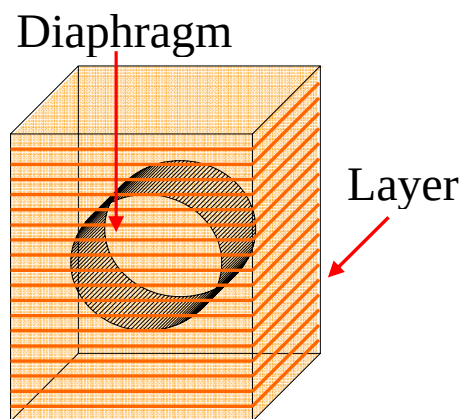


Fig.16 Layer stack technique for the diaphragm

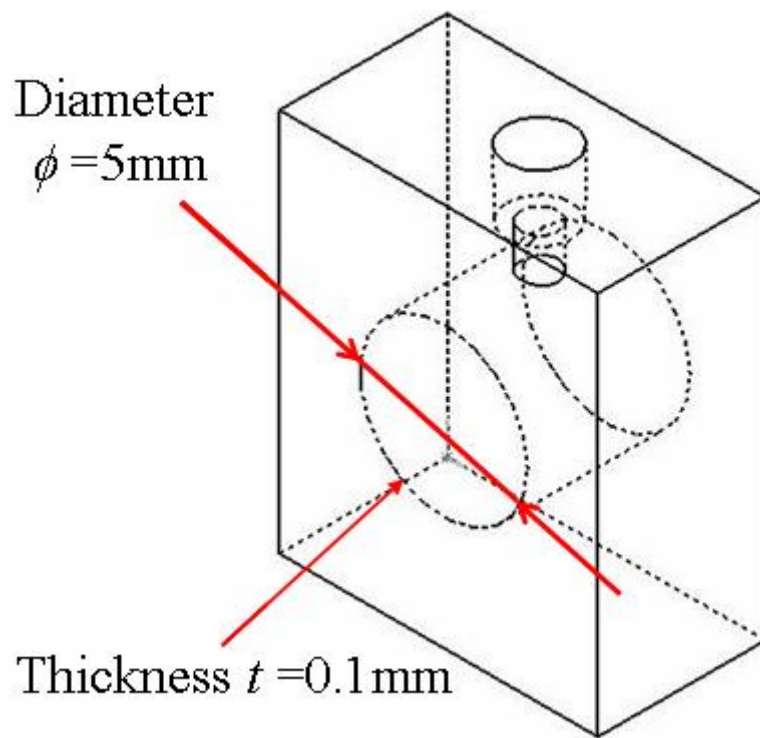


Fig.17 Diaphragm

4.2 ダイアフラム特性実験

今回試作したダイアフラムについてその特性を調べるため，入力圧力に対する薄膜中央部の変位を計測した．実験装置について Fig18 に示す．空気圧を駆動源とし，それにより発生した変位をレーザ変位計（株式会社キーエンス社製 LB-1000）を用い測定する．

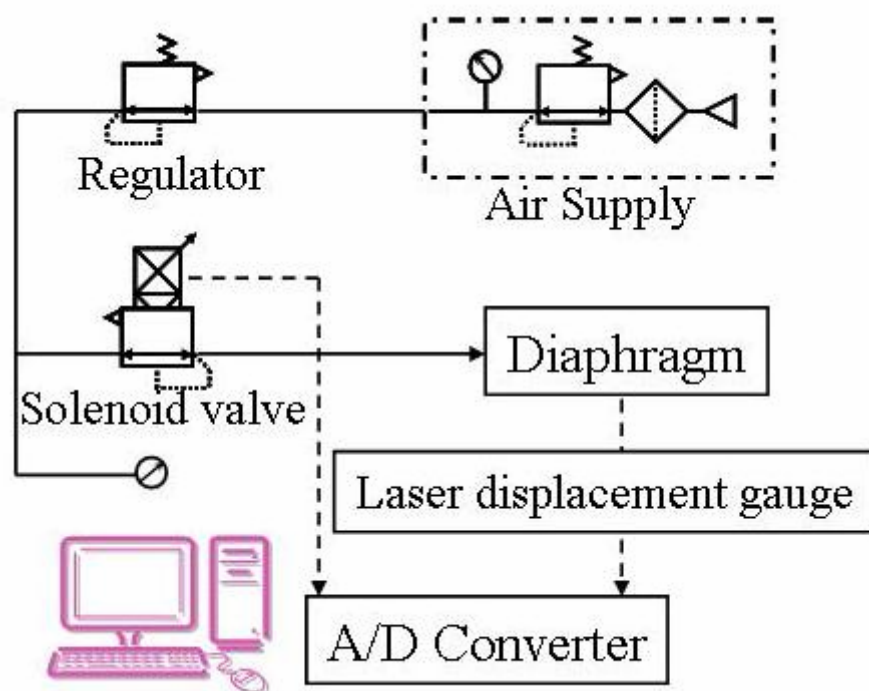


Fig.18 System configuration

4.3 静特性

実験によって計測した静特性を Fig.19 に示す. ダイアフラムに圧力を 0～0.1MPa の間を 5Pa 刻みで増減させ, そのときのダイアフラムの変位を計測した. 結果, 図のように大きなヒステリシスが見られた.

この原因として, 光硬化性樹脂が硬化する際, 樹脂が収縮をし, それによる歪みによるものと考えられる.

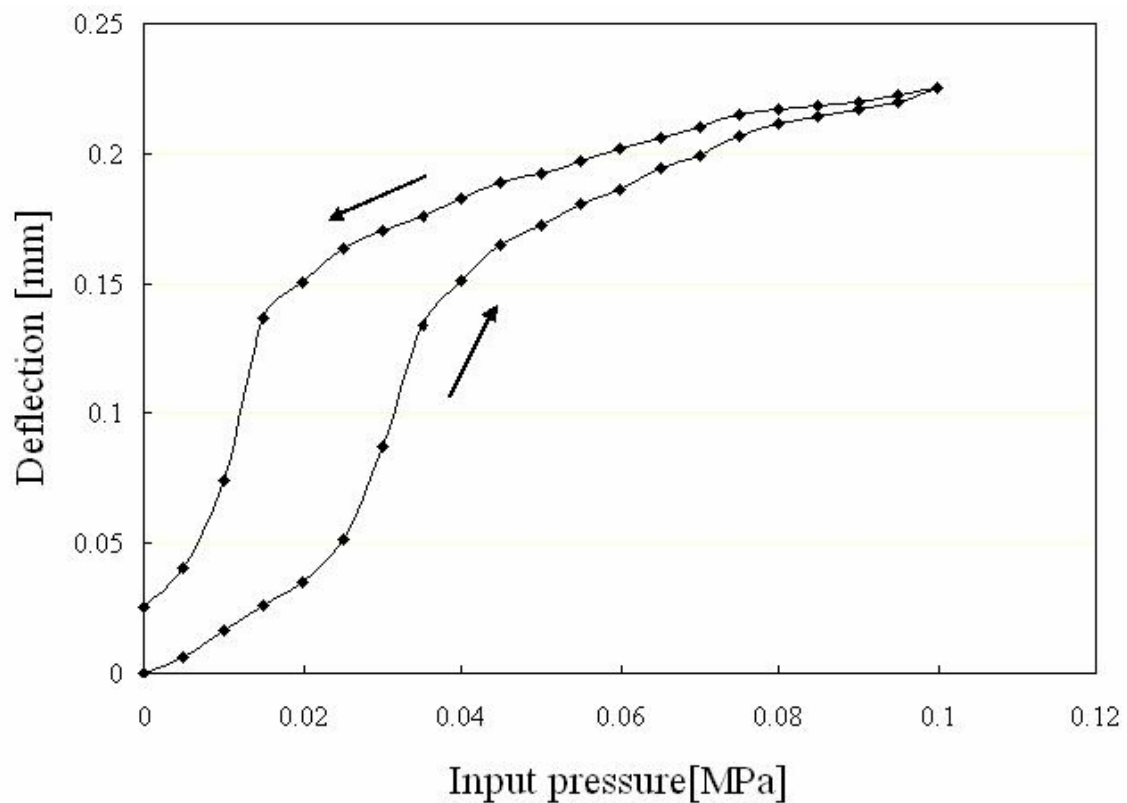


Fig.19 Static characteristics for the diaphragm

4.4 動特性

試作ダイアフラムの動作特性の評価として、電磁弁にステップ信号を入れそのときの出力の応答を調べた。Fig.20 にその結果を示す。図のように電磁弁を開いてから出力が定常値になるまでおよそ 90ms である。ただしこれは電磁弁の応答特性も含まれている。

また、0.05MPa を入力圧とした際の特性が他と違うが、これは静特性で示したように樹脂の歪による、入力圧に対する変位の勾配が違う領域であったためであると考えられる。

Fig.21 に、電磁弁の立ち上がりの特性について示す。50, 100, 150, 200Pa について計測した。

また Fig.22 には電磁弁からの入力圧力とダイアフラムが発生した変位をとった図を示す。これより先ほどの動特性における 0.05MPa の挙動について入力圧に対し、発生変位の変化量が大きい領域であり、また 0.05MPa にて入力圧が一定になった後の変位も大きく、定常値をとるまで長い時間を有するということが分かる。入力圧 0.04MPa, 出力変位 0.05mm ほどまでは入力圧に対し、出力がリニアであり、アクチュエータとして利用するに適した領域であると考えられる。

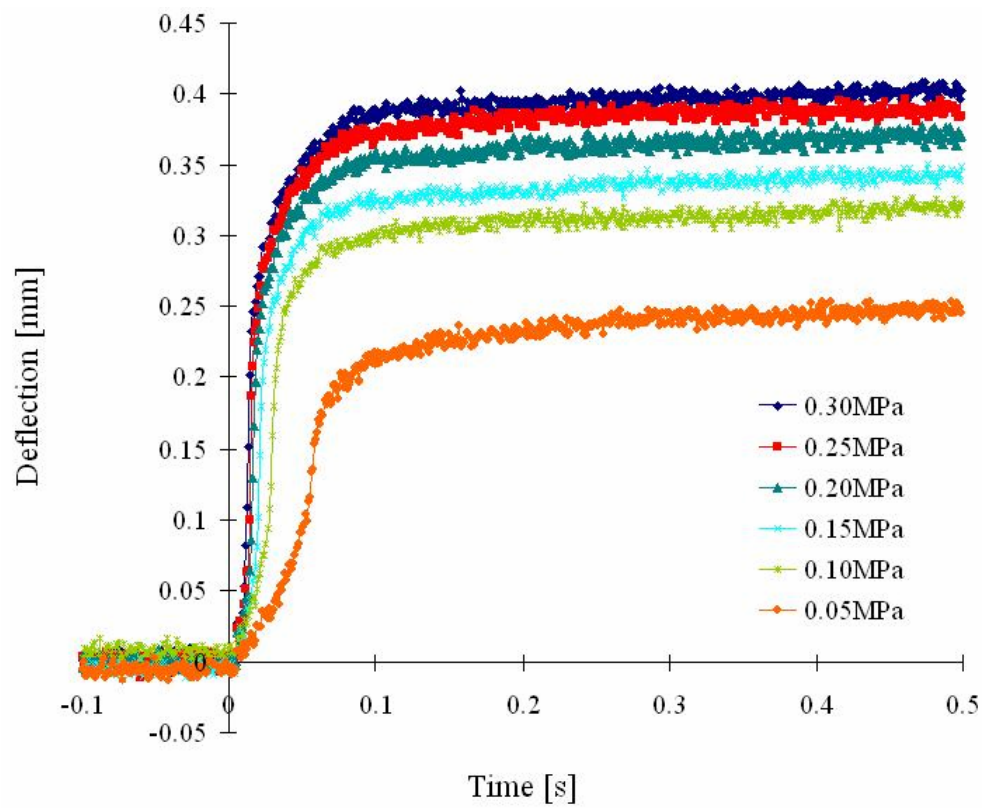


Fig.20 Dynamic characteristics for the diaphragm

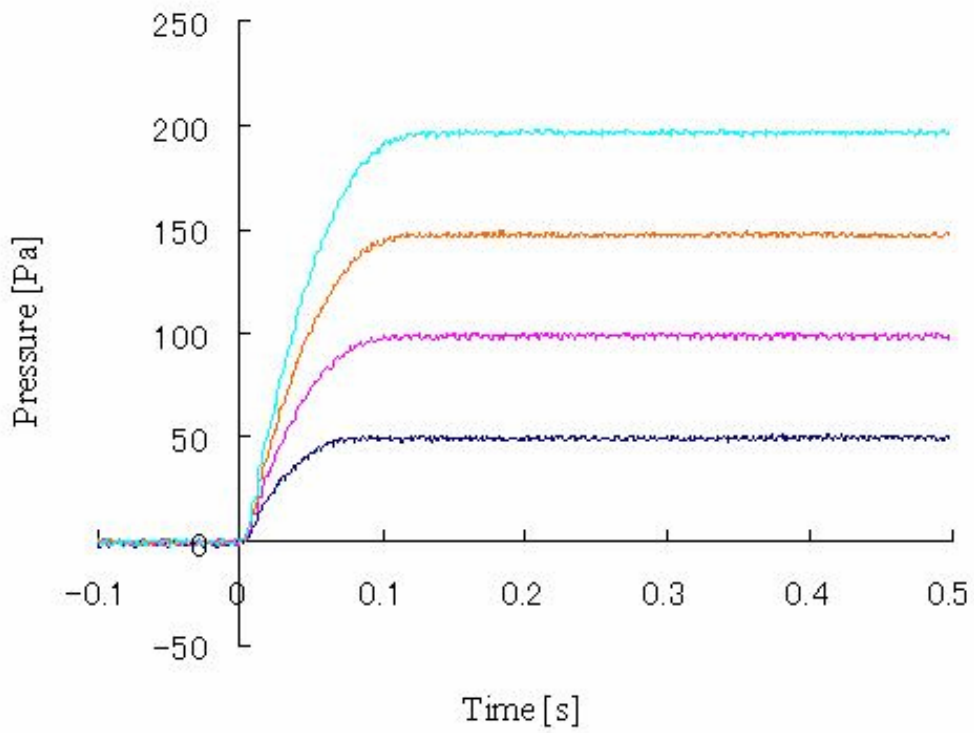


Fig.21 Dynamic characteristics for the solenoid valve

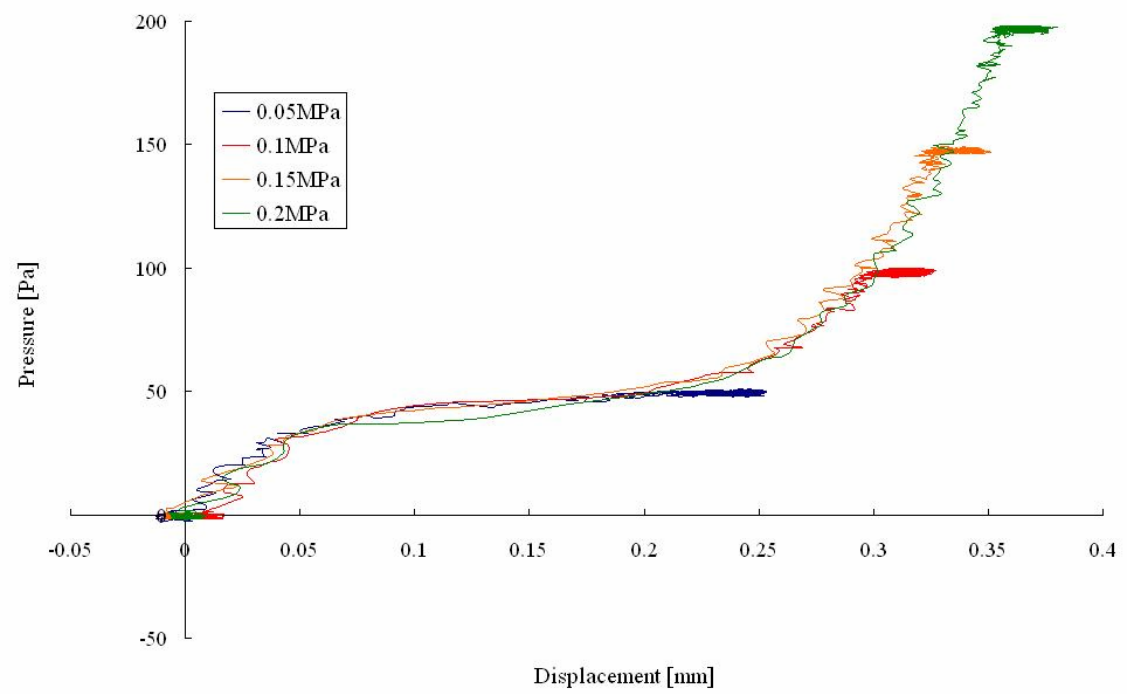


Fig.22 Pressure and displacement graph

4.5 ECF 駆動ダイアフラム

駆動源に多段式 ECF ポンプを用いた ECF 駆動ダイアフラム型アクチュエータを試作した。Fig.21 に試作したアクチュエータの概要を示す。ダイアフラムの形状は上述したものと同型で、直径 5mm、膜厚 0.1mm であり、その上部に多段式 ECF ポンプ（8 連）を埋め込み、最上部には ECF タンクが設置してある。

この ECF 駆動ダイアフラムについて、多段式 ECF ポンプに入力電圧 5kV をかけ、ECF ジェットが発生する圧力をおよそ 1kPa とし、その入力圧に対するダイアフラムの変位を計測した。Fig.22 は実験装置の概要である。

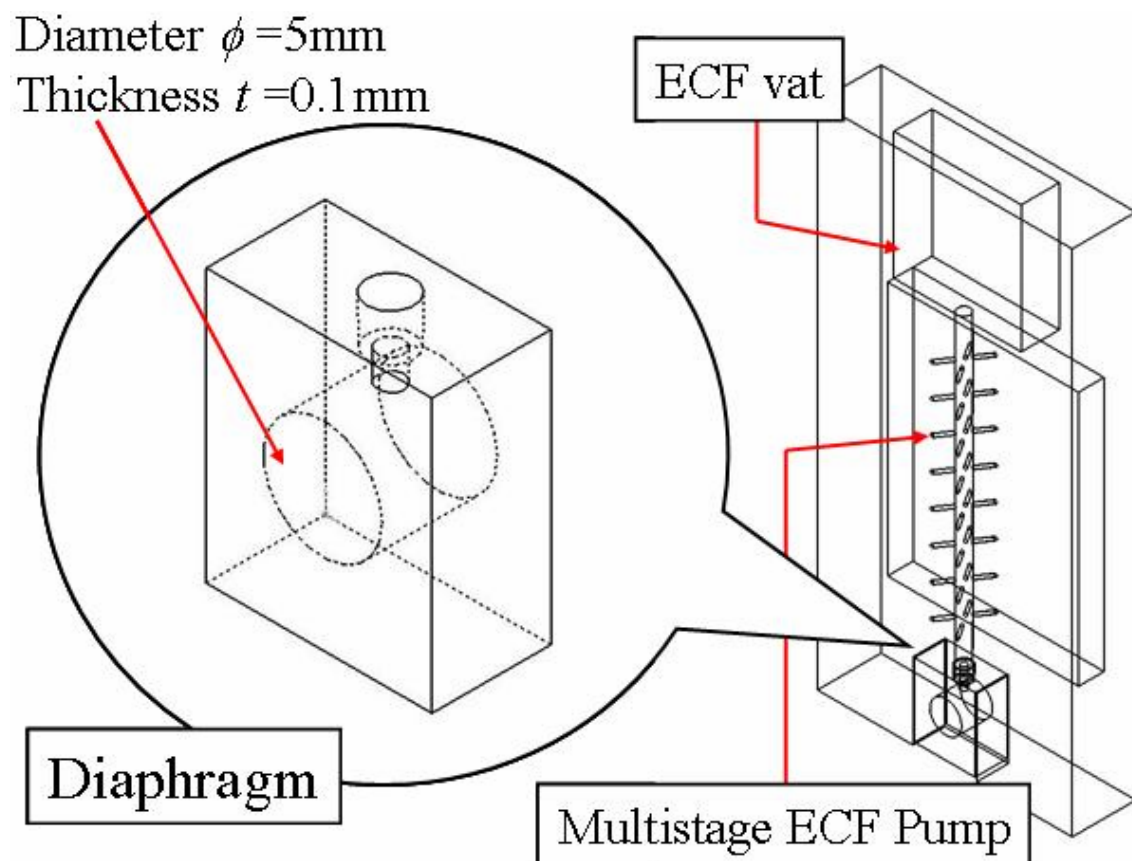


Fig.23 Diaphragm actuator powered by ECF

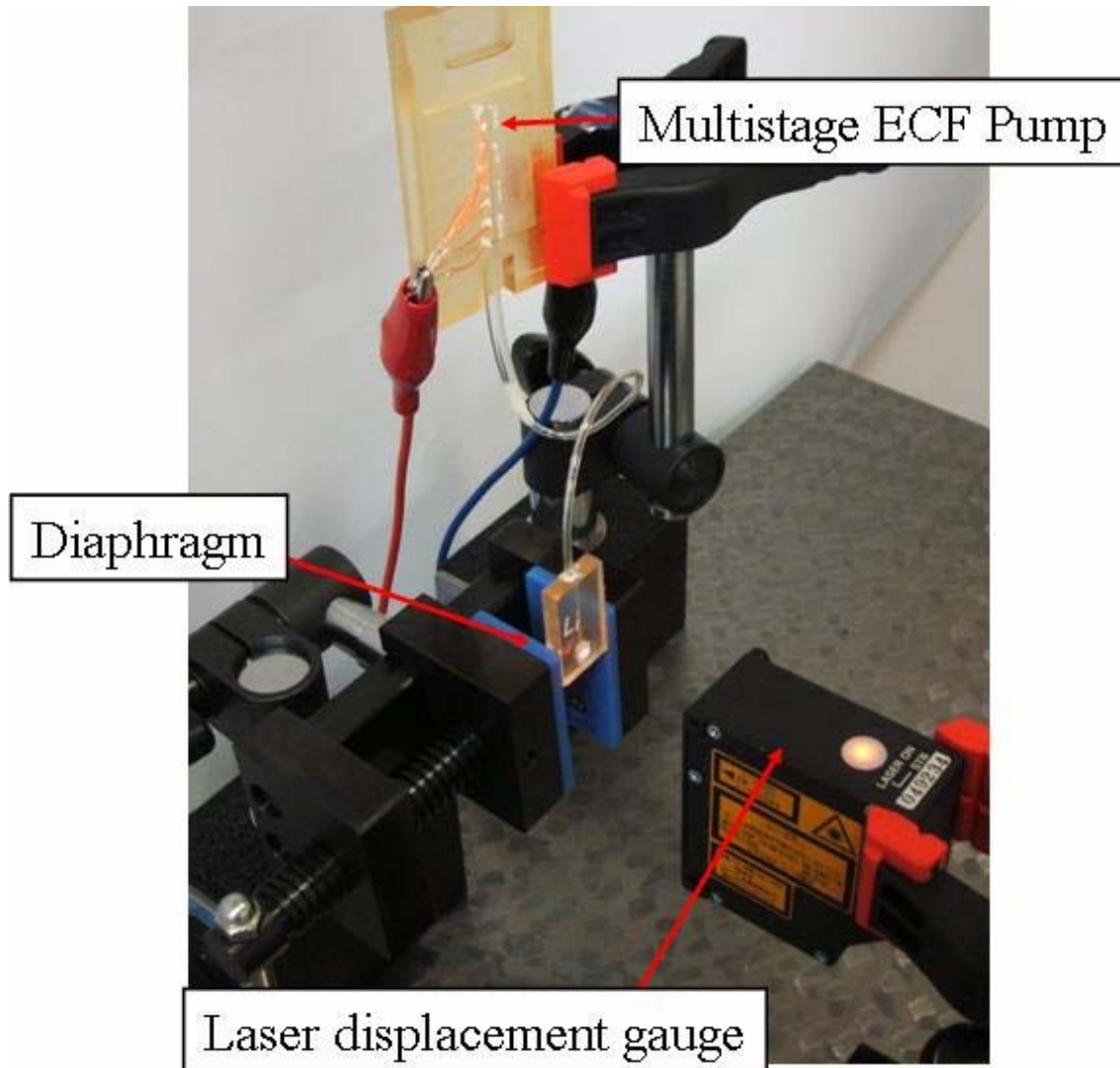


Fig.24 Photograph of the diaphragm actuator powered by ECF

4.6 動作実験

Fig.に応答結果を示す．ダイアフラムの変位がレーザ変位計の測定レンジより小さいため，特性ははっきりしないが，微小ではあるがおよそ $3\mu\text{m}$ の動作を確認することが出来た．図は ECF 駆動用の高電圧電源にステップ状電圧を印加した時間を 0 秒とした．ステップ状電圧を加えてから定常値になるまでおよそ 40ms で，高電圧電源の立ち上がり時間は電源メーカーの仕様より約 20ms であるため，20ms 程度で電圧から圧力への変換が行われていると考えられる．

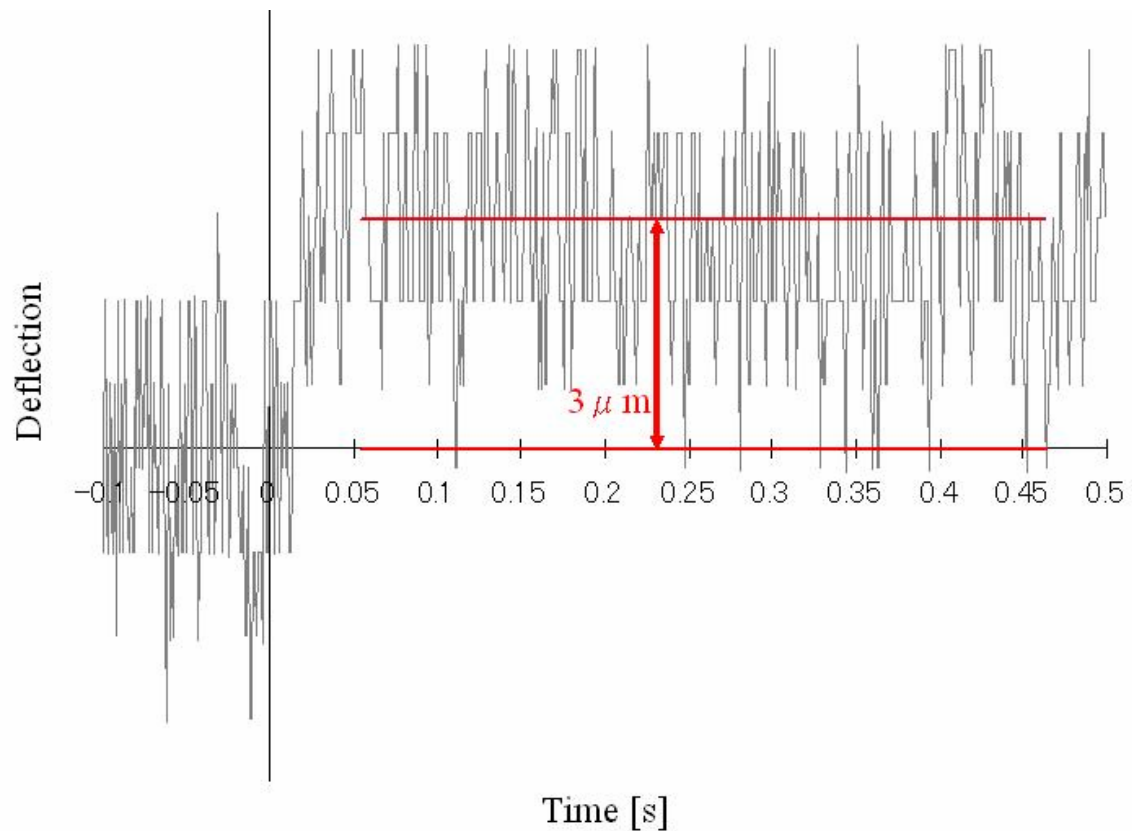


Fig.25 Pilot study for the diaphragm actuator powered by ECF

第5章 結論

光造型法による一体造形ダイアフラムを試作し、動作実験を行った。またその駆動源としての多段式 ECF ポンプの利用を検討した。

ダイアフラム型アクチュエータに関しては、微小ではあるが動作を確認することが出来た。光造形による一体造形は、特に複雑な立体構造をとる流体アクチュエータなどのマイクロ化に向け有効であり、アクチュエータの集積化・小型化への一つの道であると言える。

しかし光造形法が故の欠点を確認された。開発途上である樹脂の物性の悪さ、硬化時の収縮による構造内部の歪みの発生、また積層造形による層の影響が非常に大きい。樹脂の物性については開発が進められているものであり、あるいは他の種類の光硬化性樹脂の利用も可能である。収縮による歪みは照射するレーザのエネルギーを調整していくことで解決の糸口になると思われる。だが、層による影響は、特にマイクロ材料力学の視点で見た場合非常に深刻な問題となる。しかし、この層の影響を抑えることよりも、むしろ今後はこの積層の特徴を生かした形状のアクチュエータを考案していく必要がある。

ECF については、マイクロアクチュエータに十分な出力を得ることが出来た。また、マイクロシステム本体に流体パワー源を埋め込むことが可能となり、マイクロアクチュエータの駆動源として有用である。

今後はマイクロ放電加工機などを用いて針状電極やリング状電極を作るなど、より高い出力が得られる電極構造の開発や、マイクロ化に向けより組み込みやすい方法を考案していく事が望まれる。また、ECF を液体シールに用いるなど、他の利用法を検討していきたい。

謝辞

本研究を行うにあたり，多大なご支援，ご指導を頂いた法政大学機械工学科田中豊教授に心からお礼申し上げます．また，研究を行う最，様々なご助言，ご指導を頂いた法政大学機械工学科御法川学助教授，ECF について多くの情報を頂いた東京工業大学精密工学研究所横田真一教授，有限会社新技術マネジメント枝村一弥社長など皆様にも，この場を借りてお礼申し上げます．

最後になったが，本学大学院の山田禎久君，石倉聖也君，中村直人君，学部生の森山輝彦君をはじめ，研究室の皆様には多くの激励と助言を頂いた．心から感謝を申し上げます．

参考文献

- 1) 樋口俊郎,「ナノテクノロジーの基礎技術-マイクロマシン技術総覧」,株式会社産業技術サービスセンター, 2003
- 2) H. F. Schulte Jr., The Characteristics of the McKibben Artificial Muscle, The Application of External Power in Prosthetics and Orthotics, pp.94-115
- 3) 則次俊郎,「空気圧アクチュエータ」,日本ロボット学会誌, 15-13, pp.355-359, 1997
- 4) 中川 丸谷編,「積層造形システム-三次元コピー技術の新展開」,工業調査会, 1996
- 5) 日本機械学会,「メカトロニクス機器の電気粘性流体を用いた制御に関する研究分科会成果報告書」(P-SC237), 1996
- 6) 日本機械学会,「知能流体工学に関する調査研究分科会成果報告書(P-SC240)」, 1995
- 7) 吉田和弘 横田眞一,「流体パワーを用いたマイクロアクチュエータに関する研究-第1報」,油圧と空気圧, 25-2, p.281, 1994
- 8) 横田眞一,「ECF ジェットを利用した流体マイクロモータ」,日本機械学会誌 vol.106 No.1014, pp.397, 2003
- 9) William. F. Pickard, Experimental Investigation of the Sumoto Effect, Journal of Applied physics, Vol.32 No.10, pp1888-1893, 1961

付録

修論発表会質疑応答

Q. 圧力計測で、流体のバックフローはあるのか？

A. 電極間にてバックフローは発生していると思われる．管路径が電極に対して狭すぎると，バックフローを阻害されるなりすると，管内にて逆流してしまう現象も確認された．

Q. 光造形で作ることの優位性、利点は？

A. 組立て工程が困難であるマイクロ化に対して一体造形の利点が大いと考えられる．現状では光硬化性樹脂の特性があまり優れていないが，今後新たな樹脂が開発されていくことや，他種の樹脂を使うことで，解決されと考えられる．

Q. ECFで流れる電流は何アンペア？人体の影響は？

A. 漏電した際には若干の問題があるものの，流れる電流は数 μ A であるため，それほど大きな問題にはならない．確実に絶縁するシステムの確立したい．

Q. 流路の壁面の処理はやったのか？

A. 造形法の性質から流路内の壁面処理は不可能．しかし，ECFは圧力損失が非常に少ないという報告もあり，大きな問題はないと考えられる．また管路形状を四角に変えることなどで，圧力損失を低下させることも可能であろう．

Q. ポンプの電極の角度は、計算で求めたのか？

A. 計算ではない．今回は線状電極を用いたため電極間 Gap を安定して狭く保つため角度を 90 度とした．また，今後は線状電極ではなく，テープ上の針状電極，円状電極を放電加工などで作製することで出力の向上を得られると思われる．

Q. 印加電圧に対して、圧力が直線になっていないが、よいのか？

A. ECF の特性である．電圧が流速に比例しているため，圧力は 2 次関数状になったのではないと思われる．入力電圧を制御することでリニアな出力を得られる．

機材仕様

レーザ変位センサ

Fig.24 に株式会社キーエンス社製可視光レーザ変位センサ LB-1000 を示す。レーザ変位計は非接触で対象物の変位を測定することが可能。また可視光なため、位置決めも容易である。



Fig.24 Laser displacement gauge

仕様

- ・測定範囲 : $\pm 5\text{mm}$
- ・スポット径 : $1 \times 2\text{mm}$
- ・直線性 : $\pm 0.25\%$ of F.S.
- ・応答性 : 915Hz(HIGH 時)/36Hz(MID 時)/9Hz(LO 時)
- ・分解能 : $2\mu\text{m}$

高圧電源

Fig.25 に松定プレジジョン社製高圧電源 HB-10 を示す。入出力比例型の高圧電源である。入力対出力電圧の計算式は以下のようなものである。

$$E_{in} \doteq \frac{\text{最大入力電圧}}{\text{最大出力電圧}} \times E_{out} \quad (2)$$

仕様により，最大入力電圧は 15V，最大出力電圧は 10kV である．また高圧電源の立ち上がり時間は約 30ms，立下り時間は約 100～500ms である．



Fig.25 High voltage DC generator

マイクロ放電加工機

Fig.24 に松下電器産業（株）社製 SP-100 を示す．放電加工は，電気エネルギーを熱エネルギーとし微小な局部に集中させ，工具電極で材料の余分な個所を溶かして除く方法である．この放電を微細な領域に連続的に起こさせて加工に利用したのがマイクロ放電加工である．特徴として以下のことがあげられる．

- 1) 加工単位や加工反力が小さい
- 2) サブミクロンの面粗さが可能
- 3) 非接触加工
- 4) 導電体ならば，ワークの硬さによらず加工可能
- 6) 電極の形がそのまま転写されるので，複雑な形状も加工可能



Fig.26 Micro electric discharge machine

仕様

- 最小加工穴径 : $5\mu\text{m}$
- 表面粗さ : $R_{\text{max}} 0.1\mu\text{m}$
- 外形寸法 : $700 \times 550 \times 760\text{mm}$
- 加工範囲 : (X) 200, (Y) 50, (Z) 10mm
- 加工槽寸法 : $310 \times 150 \times 45\text{mm}$
- 軸受け : V 字状セラミックス軸受け
- その他 : 電極修正装置 (WEDG)