

法政大学学術機関リポジトリ

HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2024-10-06

フルイディクスを用いたマイクロバルブに関する研究

山田, 禎久 / YAMADA, Sadahisa

(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

フルイディクスを用いたマイクロバルブ
に関する研究

Design and Fabrication of Microvalve Using Fluidic Amplifier

大学院工学研究科
機械工学専攻修士課程

山田 禎久

目次

1. 緒論	3
1.1 マイクロマシン	3
1.2 マイクロ世界での物理法則	5
1.3 本研究の目的	6
2. フルイディクス	7
2.1 概念	7
2.2 特徴	9
2.3 層流比例増幅素子	10
3. マイクロバルブの試作	13
3.1 製作方法	13
3.2 構造および設計	15
4. 動作特性実験	20
4.1 実験装置	20
4.2 基準となるLPAの動作特性実験	22
4.2.1 半円形LPAの静特性実験	22
4.2.2 カバープレートの形状による影響	28
4.2.3 考察	30
4.3 LPAの縮尺による影響	31
4.3.1 半円形LPAの縮尺による影響	31
4.3.2 円形LPAの縮尺による影響	34
4.3.3 考察	36
5. 結論	37
謝辞	38
参考文献	39
付録A 微差圧計KL12の電流 - 電圧変換回路	40
付録B マイクロ放電加工機	41
付録C 修士論文審査会の質疑応答	44

Fig.1	Development example of Micromachines	4
Fig.2	Traditional Valves	6
Fig.3	Photograph of Fluidics	8
Fig.4	Laminar Proportional Amplifier	11
Fig.5	Principle of MicroStereo Lithography	13
Fig.6	Models with Microstereo Lithography.....	14
Fig.7	Viper SLA System (Microstereo Lithography).....	14
Fig.8	Dimensions of Standard LPA	16
Fig.9	Schematic Diagram of Prototype LPA	17
Fig.10	Photograph of Prototype LPA.....	17
Fig.11	Cover Plate of Prototype LPA	18
Fig.12	Photograph of Experimental Setup.....	20
Fig.13	System Configuration	21
Fig.14	Static Characteristics for LPA×1S.....	23
Fig.15	Static Characteristics for Control Pressure Change.....	24
Fig.16	Static Characteristics for Supply Pressure Change	26
Fig.17	Static Characteristic for Cover Plate Change	28
Fig.18	Static Characteristics for Scale Models (LPA_S, $P_s=1\text{kPa}$).....	32
Fig.19	Static Characteristics for Scale Models (LPA_S, $P_s=500\text{Pa}$).....	33
Fig.20	Static Characteristics for Scale Models (LPA_C, $P_s=1\text{kPa}$).....	34
Table1	Dimensions of Prototype LPA	19
Table2	Pressure Gain for Control Pressure Change	25
Table3	Pressure Recovery Ratio for Control Pressure Change.....	25
Table4	Pressure Gain for Supply Pressure Change.....	27
Table5	Pressure Recovery Ratio for Supply Pressure Change.....	27
Table6	Pressure Gain for Cover Plate Change	29
Table7	Pressure Recovery Ratio for Cover Plate Change	29
Table8	Pressure Gain for Scale Models (LPA_S, $P_s=1\text{kPa}$)	32
Table9	Pressure Recovery Ratio for Scale Models (LPA_S, $P_s=1\text{kPa}$)	32
Table10	Pressure Gain for Scale Models (LPA_S, $P_s=500\text{Pa}$)	33
Table11	Pressure Recovery Ratio for Scale Models (LPA_S, $P_s=500\text{Pa}$).....	33
Table12	Pressure Gain for Scale Models (LPA_C, $P_s=1\text{kPa}$)	35
Table13	Pressure Recovery Ratio for Scale Models (LPA_C, $P_s=1\text{kPa}$).....	35

〈付録〉

Fig.A1	I/V Converter.....	40
Fig.B1	Principle of Electrical Discharge Machining (EDM)	42
Fig.B2	Models with EDM.....	42
Fig.B3	SP-100 (EDM)	43

1. 緒論

1.1 マイクロマシン

マイクロマシンは、寸法が1mmに満たないようなマイクロ部品を含むデバイスや、それを集積したシステムを作動させる諸技術の総称である¹⁾。医療・情報通信・バイオ・航空宇宙などの様々な分野において、機器の小型軽量化、低消費動力化、高密度（高集積）化などを実現するためのキーテクノロジーとして大きな期待がかけられている。半導体製造技術が急速に進歩したことにより、マイクロマシンの実現が夢物語ではなくなり、次世代重要技術として世界各国で盛んに研究開発が行われるようになってきた。その結果、様々なマイクロ加工法やマイクロデバイスが開発されている。

特に、現在、科学技術で最も急速に展開しているバイオテクノロジーの分野においての開発が目立つ。バイオ関連機器であるマイクロ化学分析システム（ μ TAS）やDNAチップ、電気泳動チップなどのマイクロ流体素子は、マイクロマシンの中でも主要なものの一つとなる可能性を持っている²⁾。それは、DNAから細胞までの生命の仕組みは、nmから μ mのオーダーの現象であり、観察手法、操作技術、さらには、解明した生命の仕組みを人口的に再現し利用する技術においても、nmから μ mのオーダーの構造が必要となるからである。このようにマイクロマシンはバイオテクノロジーと密接に関係しており、バイオテクノロジーを支える最も重要な基盤技術であるといえる。

また、バイオテクノロジーが発達し、生命の巧妙な仕組みの解明が進められる中で、医療や薬品、農業等の分野においても応用技術の開発とその実用化が期待されてきている。医療に関して言えば、DDS（ドラッグデリバリーシステム:医薬品を、体内の治療部位に、途中で他からの影響を受けず、また他に影響を及ぼすことなく、確実に到着させる方法）のような応用が考えられる。このシステムが実現すれば、現在のメスによる外科手術を減らすことができ、患者に対しても負担を少なくさせることができる。このためにはマイクロアクチュエータやマイクロセンサ、マイクロバルブやマイクロポンプなどのようなマイクロ流体素子を組み合わせたマイクロメカトロデバイスを開発しなければなら

ない。しかし、現段階では、マイクロメカトロデバイスの一部となるマイクロマシンでさえ、mmオーダのものが多く実用化には程遠いのが現状である。Fig.1 に、これまでに開発されたマイクロマシンの開発例を示す³⁾⁴⁾。

以上のように、マイクロマシンは様々な分野でニーズが高く、将来において必要不可欠な技術であると思われる。我々は、その重要性を認識し、マイクロマシンの研究開発を行うことにする。中でも、マイクロ流体素子の一つであるマイクロバルブに着目した。マイクロバルブは、さきほど述べた DDS などのようなマイクロマシンを結集させたマイクロメカトロデバイスの内の一部分で機能することもできれば、バイオ関連分野における解析システムとして、それ自身単体で機能することもできるからである。

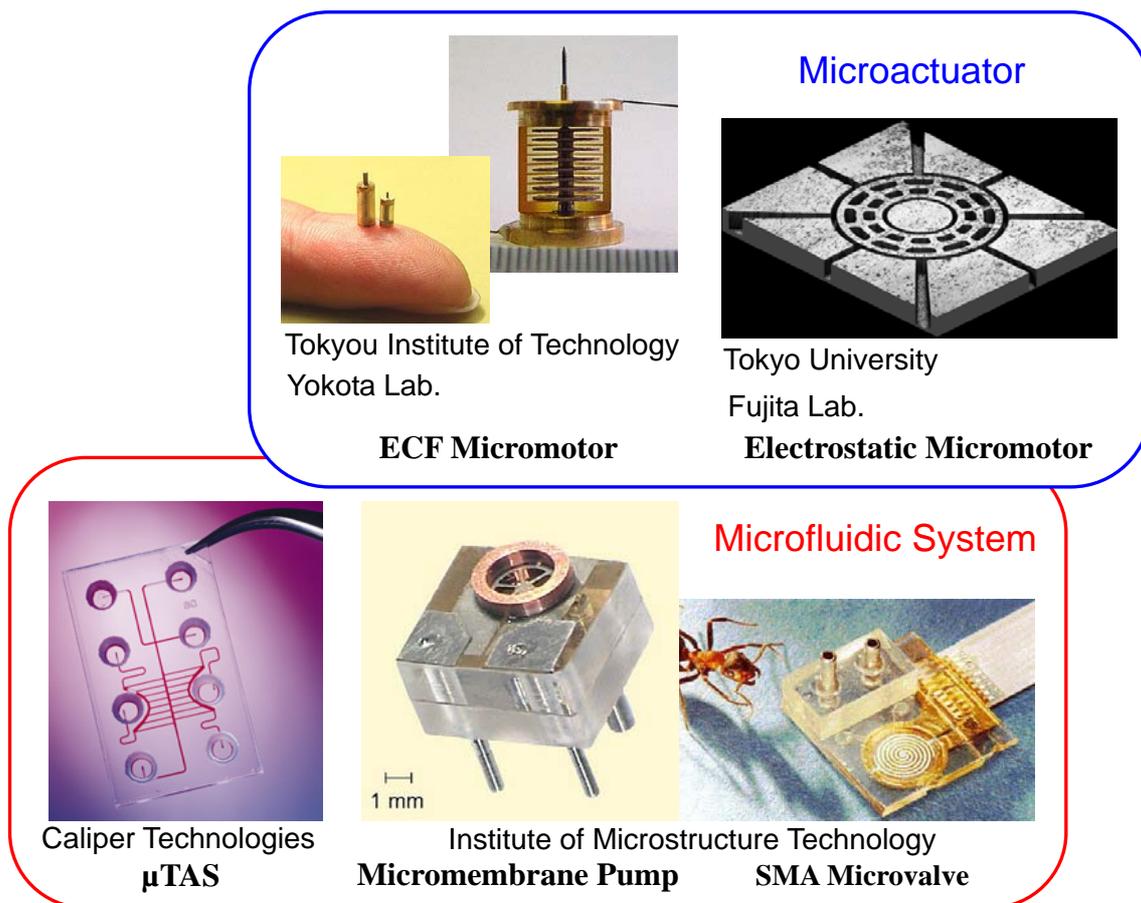


Fig.1 Development example of Micromachines

1.2 マイクロ世界での物理法則

マイクロマシンの構成要素のサイズは、原子・分子のオーダーから mm オーダーまで様々であるが、アクチュエータやセンサなど、ある程度の機能を持った微小構造は、 μm オーダー以上のものが多い。 μm 程度の寸法領域で用いられる物理法則は、通常のマクロ領域の法則とそれほど変わるわけではない。例えばニュートンの運動方程式や、連続体を仮定した材料や流体の基礎方程式は、多くのマイクロマシンの要素にも適用可能であり、量子化などの影響は無視できる場合が多い。しかし、この領域で起こる現象は、マイクロサイズを単に縮小したものにならない。それは、対象物体に及ぼす様々な物理量の影響の度合いが、ミクロとマイクロでは異なっているためである。例えば、重力は、マクロの物体の運動には大きな影響を及ぼすが、 μm 程度の物体に対する影響は、他の力に比べて無視できるほど小さくなる。したがって、マイクロマシンを設計するには、微小領域で支配的になる量が何であるかを把握することが必要である。

その目安を与えるのに「スケール効果」と呼ばれるものがある⁵⁾。スケール効果は物体の代表寸法 L が変化したときに、様々な物理量が L の何乗に比例して変わるかを示したものを言う。一般に L の次数が大きい量はマクロの領域で卓越し、 L の次数が小さい量は、ミクロの領域で卓越する。スケール効果は、「寸法効果」、「スケーリング則」などと呼ばれることもある。

1.3 本研究の目的

マイクロバルブの開発を行うにあたり，上節で述べた「スケール効果」を考慮すると，マイクロ世界では表面間力に起因する吸着，摩擦，摩耗などが機械の性能，エネルギー効率，耐久性，信頼性に大きな影響を与えるようになる．この点で，機械的な可動部を持つ従来のバルブの構造は，マイクロ世界において可動部を動かすのに大きな力が必要となるので，不向きといえる．Fig.2 に従来のバルブの構造を示す．また，マイクロマシンの根本的な問題として，多数の部品を 3 次元的に組み立てる作業は困難であるため，なるべく機構が単純，且つ，少ない構成部品で製作することが望ましい．

そこで，本研究では，流体の流れを機械的な可動部を用いずに，切換えたり制御したりするフルイディクスに着目した．本論文では，マイクロバルブにおけるフルイディクスの有効性の評価とその今後の展望について述べる．

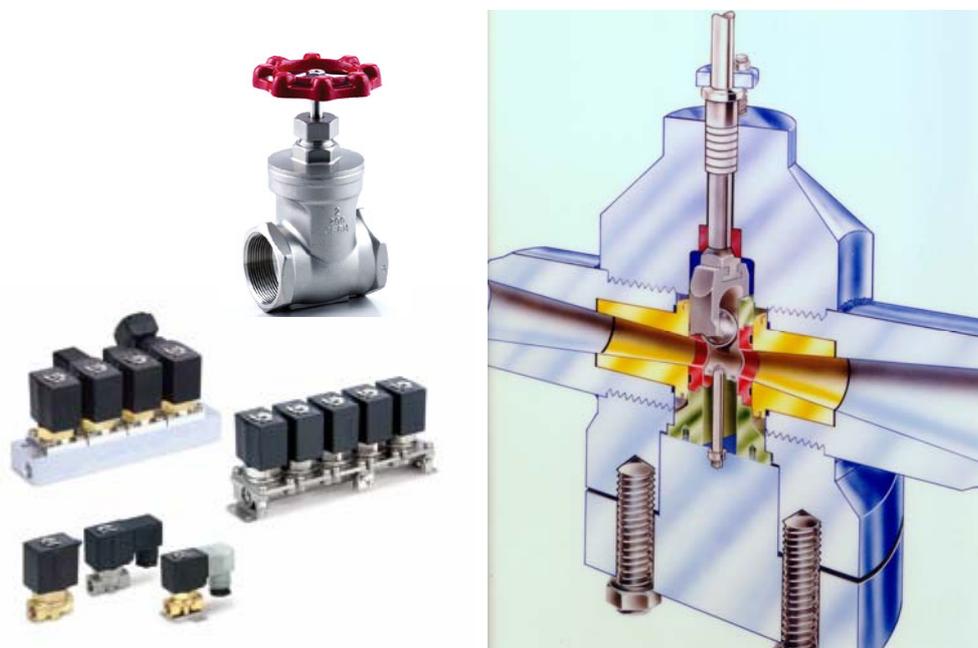


Fig.2 Traditional Valves

2. フルイディクス

2.1 概念

フルイディクス (Fluidics) は、流体の運動により信号を発生し、信号を処理し、流れを制御する技術の体系といえる⁶⁾。したがって、流路の形状が重要であり、流路の内部に膜や弁のような動く部分の存在を必要としない。信号の発生、処理、流れの制御には、流れに関して起こるすべての現象が利用される。例えば、噴流の衝突、乱れの発生とその収束、角運動量の保存、噴流の付着とはく離、抵抗あるいは流量と圧力差の関係の変化、流れの摩擦による巻込み、などが利用されている。また、条件によっては、流れにより動かされる膜、弁などを介在させる方法も、効果的に利用されている。Fig.3 に、フルイディクスを示す。

フルイディクスは 1960 年を出発点とする技術で、アメリカ陸軍の研究所員であった Dr.R.Bowles, B.M.Horton, R.W.Warren, の 3 人が渦流れを利用した新形の真空掃除機の発明を試みているうちに、渦流れ、流れの偏向、および付着流れを応用した流体素子の着想を得て、開発されたものである。

彼ら以前にも、1920 年に N.Tesla の流体ダイオード、1932 年に Dr.H.Coanda による付着流れの応用、1959 年に Prof.L.A.Zalmanzon の翼形表面への噴流の付着とはく離を利用した特許がある。これに対し、前記 3 名が単独または連名で取得した基本的な特許は、偏向形と付着形の素子、角速度などのセンサ、フィードバックおよび多段接続、発信器など約 30 件に達している。

乱流の噴流の偏向により信号を比例増幅させると、噴流の乱れがノイズの原因となり、SN 比の改善が行き詰まった。これに対して、LPA の略称で呼ばれる層流比例増幅素子 (Laminar Proportional Amplifier) が開発され、この欠点が著しく改善された。

西ドイツの Dr.H.Brombach は液体流れの制御に適した渦室を設計し、可動部を用いない流量制御というフルイディクスの理想を具体化した。流量が少ないときには抵抗の小さい流路となり、流量が増すと渦流れが生じて流量が抑制される。このような基本設計を応用して、汚水処理場への流入流量の制御と洪水調

節用小規模ダムからの放水量制御に成功している。

フルイディクスシステムは、出力の圧力または流量を制御するために構成された流路の組合せで、センサ、信号処理および信号変換回路、論理回路、演算増幅回路ならびに操作器などにより構成され、必要に応じて受動的に動かされる要素を含むこともある。

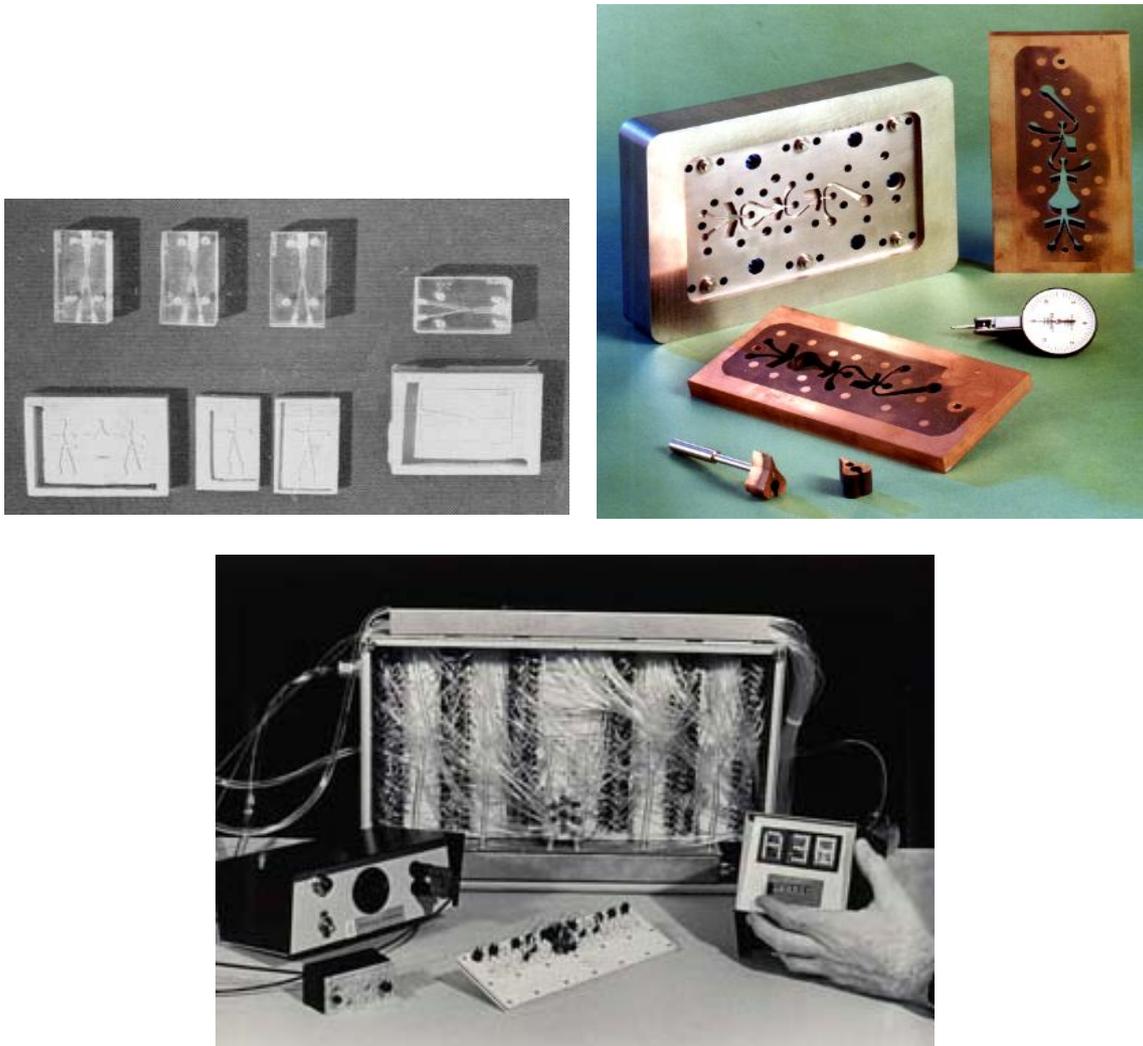


Fig.3 Photograph of Fluidics

2.2 特徴

フルイディクスは環境条件が劣る場合、例えば、高温、振動衝撃、化学汚染、放射線などの電子機器が信頼されがたい場合に、安定な制御が行えるとして開発された。流体の運動のみにより制御できるならば、構造が単純で故障せず、安全で低コストのシステムを構成できる可能性を持つ。

代表的な例として、Dr.H.Brombachによる下水ならびにダムの流量制御がある。流体が汚れていても、混入物があっても、流路を通過できるならば制御作用には影響を及ぼさない。また、自然の落差を生かせるため、制御のためのエネルギー源が不要である。このように、流れが情報とともにパワーを持っている場合、パワーフルイディクスと呼ぶことがある。

イングランドでは、清浄な動植物や汚染物質を隔離して取り扱うのに使われるグローブボックスの圧力制御、および放射性の液体のためのポンプにフルイディクスが使われている。

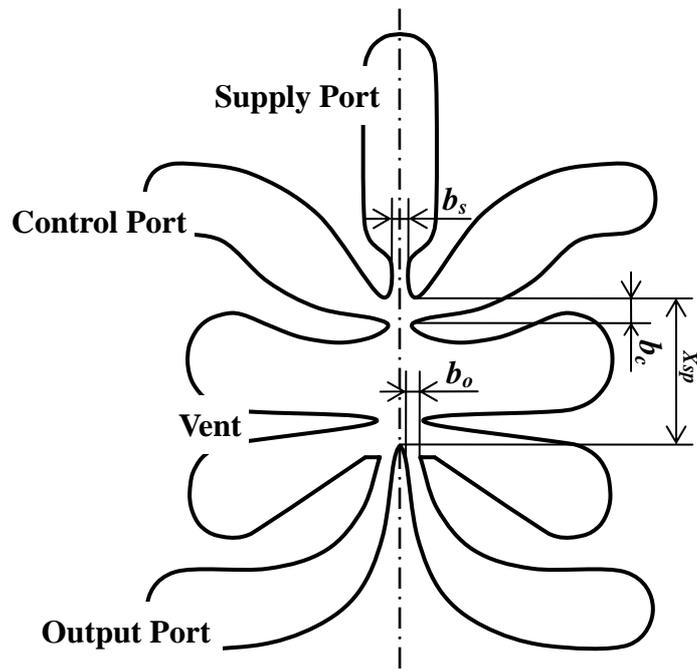
この他に、主として空気をを用いたセンサが各種のプロセスに利用され、これと操作器や制御システムを結ぶために使われている。対象は、食品、薬品、医療機器、電子部品などで、いずれも清浄であることが要求される。空気は無給油圧縮機やフィルタによる浄化を得て使用される。また、クリーンルームの内圧をドアの開閉にかかわらず一定に保つ大形素子も開発された。粉塵などが飛散する環境では、フルイディクス回路の内圧を高めることにより汚染が防止される。電磁ノイズなどにより誤作動を起こすおそれはないといえる。

以上のように、フルイディクスは外部の影響を受けず、流体の質による影響も受けない制御が可能である。また、外部に対しても影響を与えず、点検補修を省略でき、長期にわたって高い信頼性を保つことができる。温度、湿度、放射能、振動、腐食などに耐える素子は、素子材料の選択によって容易につくることができる。気体系、液体系に関係なく、過負荷、緊急停止などの異常が起こっても、衝撃や損傷を生ずるおそれがない、などの長所を有する。これに対し、常に流体を供給し続けなければならないので、ダムや下水のような場合を除くと、パワー消費を節約しにくい。また、管路内の信号伝達速度は、空気の場合、基本的に音速で、電気信号と比べて著しく遅いという欠点がある。

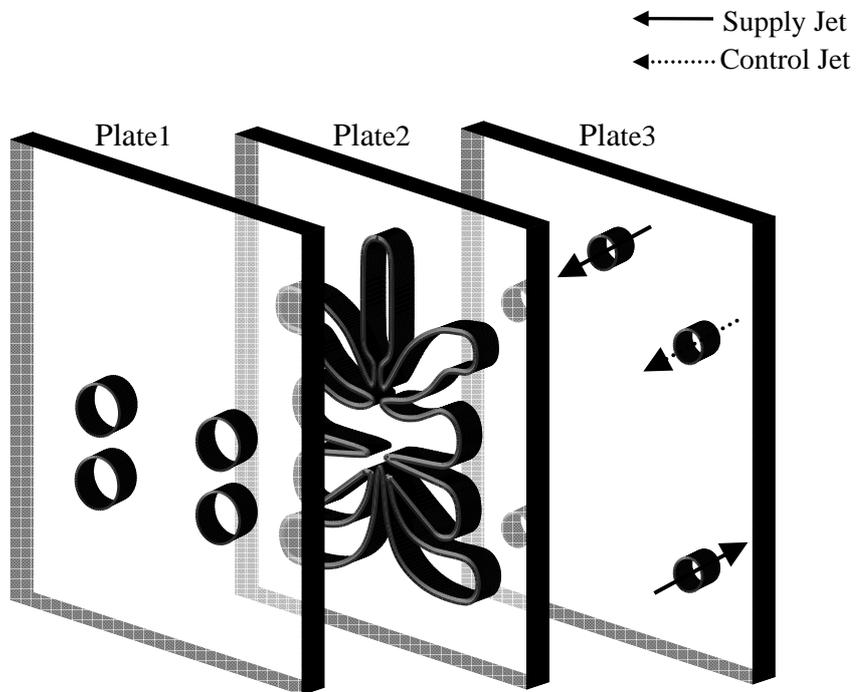
2.3 層流比例増幅素子

本研究では，フルイディクスの代表的な素子である層流比例増幅素子（LPA:Laminar Proportional Amplifier）を用いる．LPAは，フルイディクスの中でもアナログ動作を行うことが出来る最も代表的な素子である．Fig.4-(a)にLPAの流路形状を示す．LPAは対称構造で，供給ポート，制御ポート，出力ポート，ベントポートから成る．主要な寸法は，主ノズル幅 b_s ，制御ノズル幅 b_c ，出力ノズル幅 b_o ，スプリッタ距離 X_{sp} である．各部の寸法は b_s を基準にして決定され，層流で動作させるため，主ノズルのアスペクト比は1以下で用いられることが多い．Fig.4-(b)のように，流路形状を持つ基板（Plate2）の上下面を平板（Plate1, Plate3）で密閉して作られる．供給ポートからの主噴流に，左右の制御ポートから微小な圧力差を加えると，主噴流は制御流の圧力差に比例して偏向する．偏向した主噴流を左右の出力ポートが受け，主噴流が偏向した量に比例した出力圧力差を発生する．上流と下流に二つ独立に設けられたベントは，出力側から入力側への影響を防ぐものである．

LPAは，圧力ゲインが高い，SN比が大きい，パワー消費量が少ない，入力インピーダンスが高い，素子内流れに相似則が成り立ちスケージングが可能である，などの優れた特徴を持っている．また，多段結合，積層化が容易でありこれによって最終的には非常に大きな圧力ゲインを得ることができる．



(a) Flow Channel Geometry



(b) Structure

Fig.4 Laminar Proportional Amplifier

【LPA を用いた理由】

LPA を本研究で用いた理由は、相似則が成り立つことや多段結合、積層化が容易な点からである。μm 程度の寸法領域で用いられる物理法則は、通常のマクロ世界の法則とそれほど変わらないので、相似則が成り立つことは、現存のモデルをそのまま小形化させても正常に動作する可能性が期待できる。また、試作したデバイスを現存のモデルと比較することができるため、評価において有利になると思われる。

また、多段結合や積層化が容易であることは、マイクロマシンを作る際の組み立ての問題を解決する一つの手段となる。また、複数アレイ化することにより、よりパワーのあるマイクロバルブを開発できる可能性が高くなり、マイクロバルブの数あるアプリケーションのうちの化学解析システムにおいて、多種の液体を同時に分析することが可能となる。

3. マイクロバルブの試作

3.1 製作方法

本研究では、LPA を 3DSystems 社製のマイクロ光造形法により製作した。マイクロ光造形法は、素材が光硬化性樹脂に限定されるが、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成できる加工方法である。Fig.5 にマイクロ光造形法の原理を示す。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数学的に切断し、スライス図形データ群を作成する。次に、スライス図形データ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。これをモデルの上端に達するまで繰り返す。硬化反応時に上下の層は強固に結合され、全体が一体化したプラスチックの立体模型が創成される。Fig.6 に、光造形法で製作した加工例を示す。

マイクロマシンを製作する際には、なるべく部品点数を少なくする必要がある。この点で、マイクロ光造形法は、部品を一体造形で製作できるため、とても有効的な加工方法であるといえる。また、製作の際に CAD データを用いるので、形状変更を容易に行えるという利点がある。Fig.7 に、本研究で使用したマイクロ光造形機を示す。



Fig.5 Principle of MicroStereo Lithography

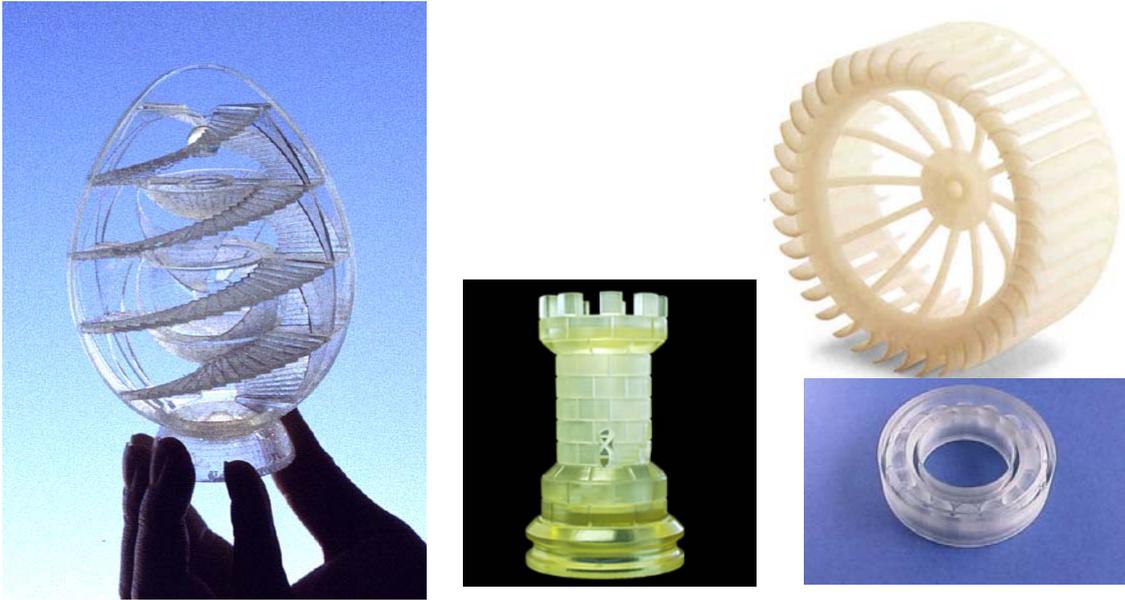


Fig.6 Models with Microstereo Lithography



— 主な仕様 —

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

Fig.7 Viper SLA System (Microstereo Lithography)

3.2 構造および設計

本研究では、文献7)の標準LPA⁷⁾の寸法を基準にして製作した。Fig.8に、本研究で用いた標準LPAの寸法を示す。標準LPAの流路形状の高さ X_h は12.065mm、幅 X_w は8.89mm、供給ノズル幅 b_s は0.38mm、制御ノズル幅 b_c は0.38mm、出力ノズル幅 b_o は0.513mm、スプリッタ距離 X_{sp} は3mm、素子厚さ h は0.5mmである。

Fig.4-(b)に示した流路形状をもつ基板 Plate2 を下面の Plate3 と一体構造で作製し、Plate1 と組み合わせることにより、合計2点の部品でLPA（以下、**LPA×1**）を試作した。Fig.9に試作したLPAの概略図を、Fig.10にその外観を示す。試作の際に、カバープレートである Plate1 のベントポートの形状は、定められていなかった。そこで、ベントポートの形状を半円形と円形に変えた2種類のカバープレートを作製した。ベントポートが半円形の

また、LPA×1の他に、LPA×1の寸法を0.8倍（以下、**LPA×0.8**）、0.5倍（以下、**LPA×0.5**）に小形化させたものも試作した。縮尺を寸法の0.8倍、0.5倍にした理由を以下に示す。

LPAのレイノズル数 Re は、素子厚さを代表長さとした、以下の式で与えられる⁸⁾。

$$\begin{aligned} Re &= \frac{hU_s}{\nu} \\ &= \frac{\sqrt{\rho}}{\mu} h\sqrt{2P_s} \end{aligned}$$

Re : レイノズル数 h : 素子厚さ U_s : 流速

ν : 動粘度 μ : 粘度 ρ : 密度 P_s : 供給圧

LPAのレイノズル数は、供給圧が一定のとき供給ノズル幅などに関係なく素子の厚さによって決まる。設計においてアスペクト比は変えずに、素子厚さも縮尺させた。よって、レイノズル数は、LPAの体積の変化に影響すると考えら

れる．そこで，LPA×1 の寸法の 0.8 倍は，LPA×1 の体積の 0.512 倍となり，0.5 倍は 0.125 倍となる．LPA×1 の体積の 0.512 倍，0.125 倍に縮尺した LPA で比較すれば，十分 LPA の縮尺による影響を知ることができると思われる．

LPA×0.8，LPA×0.5 でも，カバープレートを 2 種類製作したので，LPA×1 と同様に，**LPA×0.8S**，**LPA×0.8C** といったように呼ぶことにする．Table1 に試作した LPA の寸法を示す．

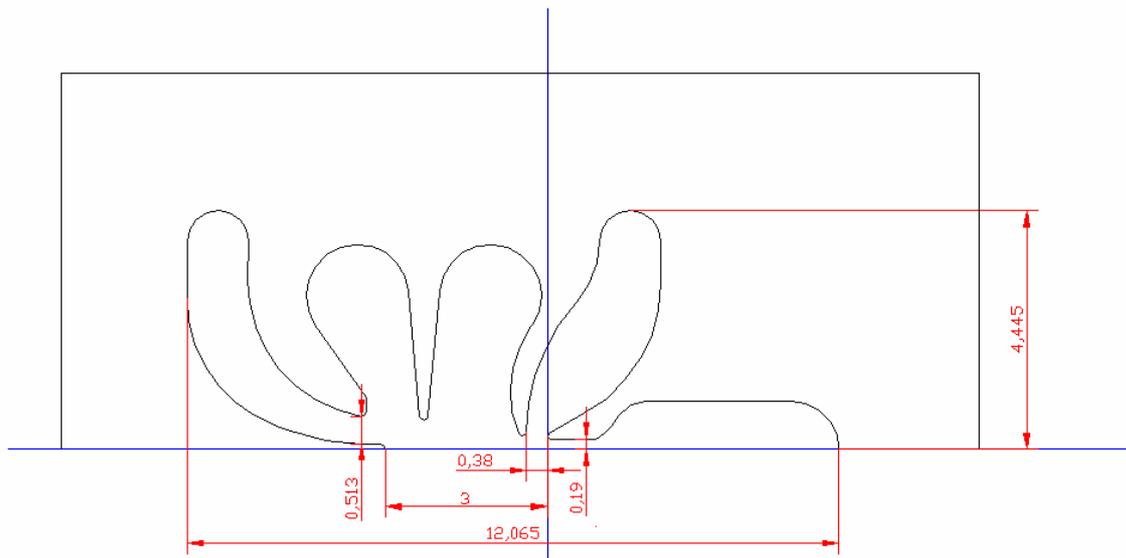


Fig.8 Dimensions of Standard LPA

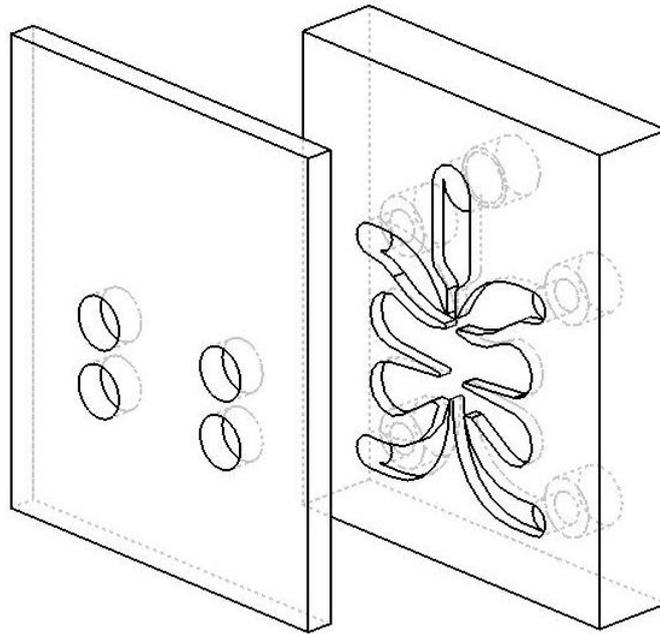


Fig.9 Schematic Diagram of Prototype LPA

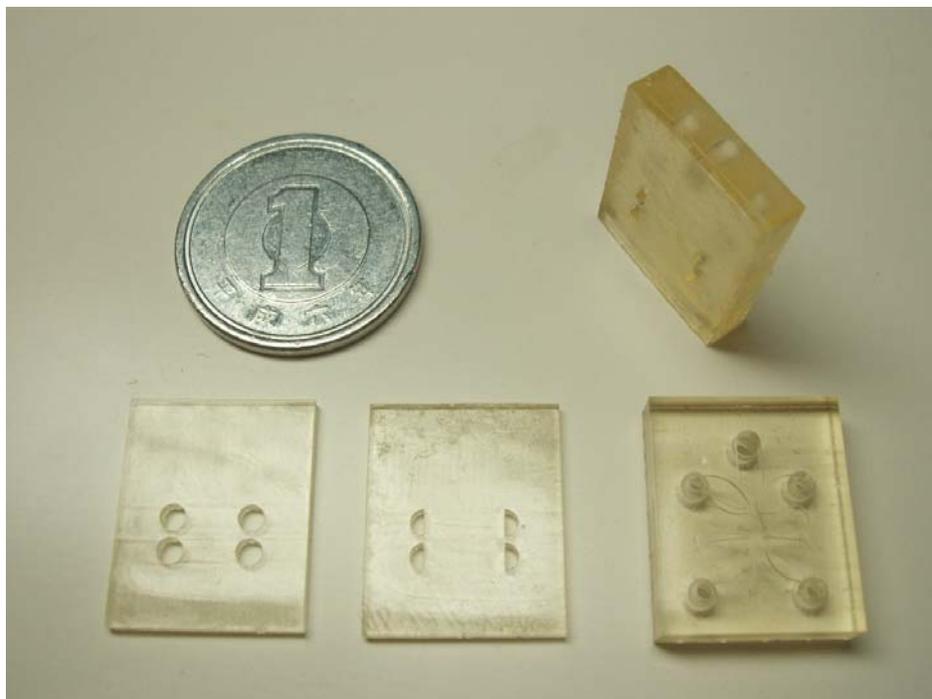
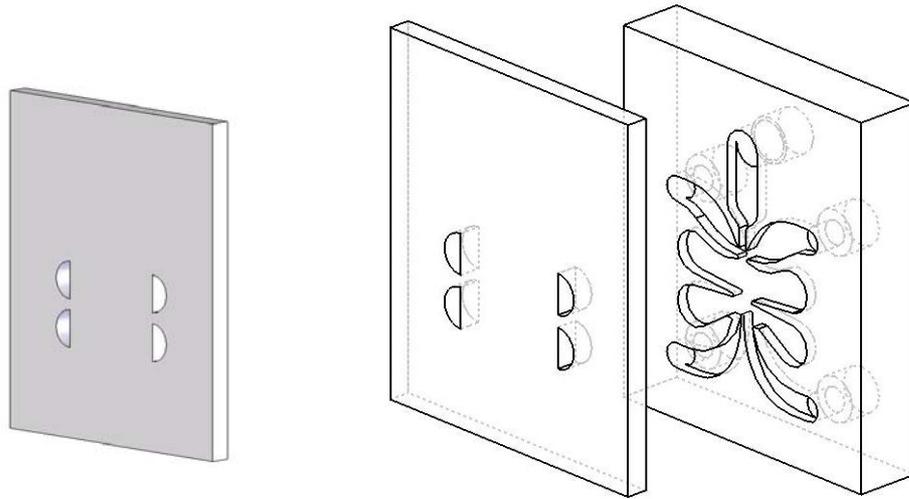
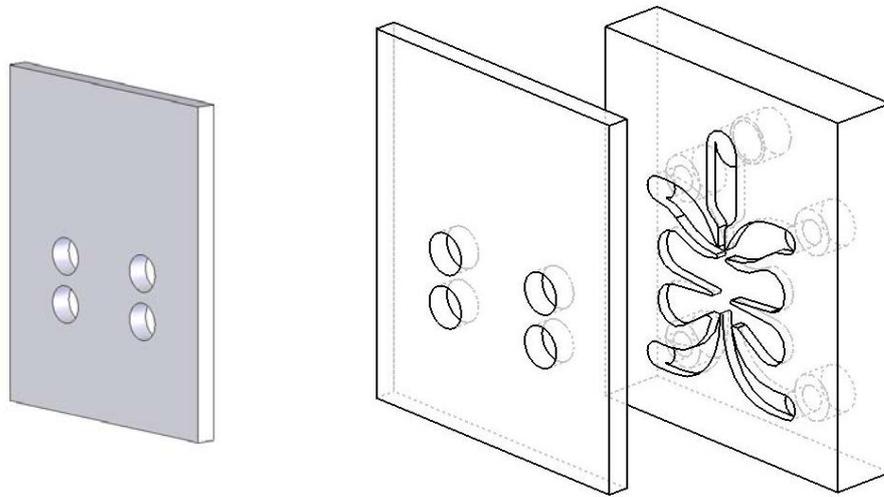


Fig.10 Photograph of Prototype LPA



(a) LPA×1S (Semicircle Type)



(b) LPA×1C (Circle Type)

Fig.11 Cover Plate of Prototype LPA

Table1 Dimensions of Prototype LPA

(unit: mm)

	LPA×1S LPA×1C	LPA×0.8S LPA×0.8C	LPA×0.5S LPA×0.5C
b_s	0.38	0.304	0.19
b_c	0.38	0.304	0.19
b_o	0.513	0.410	0.257
X_{sp}	3.0	2.4	1.5
h	0.5	0.4	0.25
X_w	12.065	9.652	6.033
X_w	8.89	7.11	4.45

4. 動作特性実験

4.1 実験装置

本研究では、実験の簡便性を考慮して、流体に空気を用いた。Fig.12 に動作特性の測定に用いた実験装置の概観を示す。また、Fig.13 に実験装置システム構成図を示す。実験装置の基本要素はスピードコントローラ（コガネイ製 TSC-L：使用圧力範囲 0~0.9 MPa）と微差圧計（長野計器製 GC62:差圧レンジ $\pm 5\text{kPa}$, KL12：差圧レンジ $\pm 5\text{kPa}$ ）である。

スピードコントローラで供給流量を調整し、微差圧計により圧力を測定することで供給圧 P_s 、制御圧 P_{c1} 、 P_{c2} を調節した。出力圧 P_{o1} 、 P_{o2} は出力端を微差圧計の一端でブロックし、他端を大気開放して測定した。出力圧を測定することで、 $\Delta P_o(=\Delta P_{o1}-\Delta P_{o2})$ を求めた。また、制御入力差圧 $\Delta P_c(=\Delta P_{c1}-\Delta P_{c2})$ は、左右のコントロールポートに制御圧をあらかじめ与えておき、 ΔP_c をゼロに設定（零入力時）してから、片方の制御圧のみを大きくしていくことで変化させた。

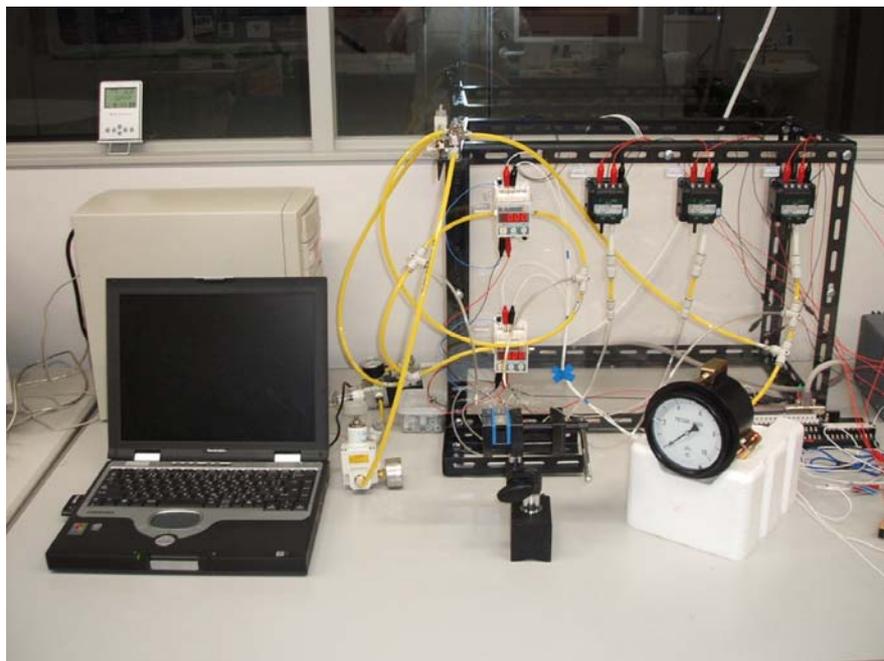
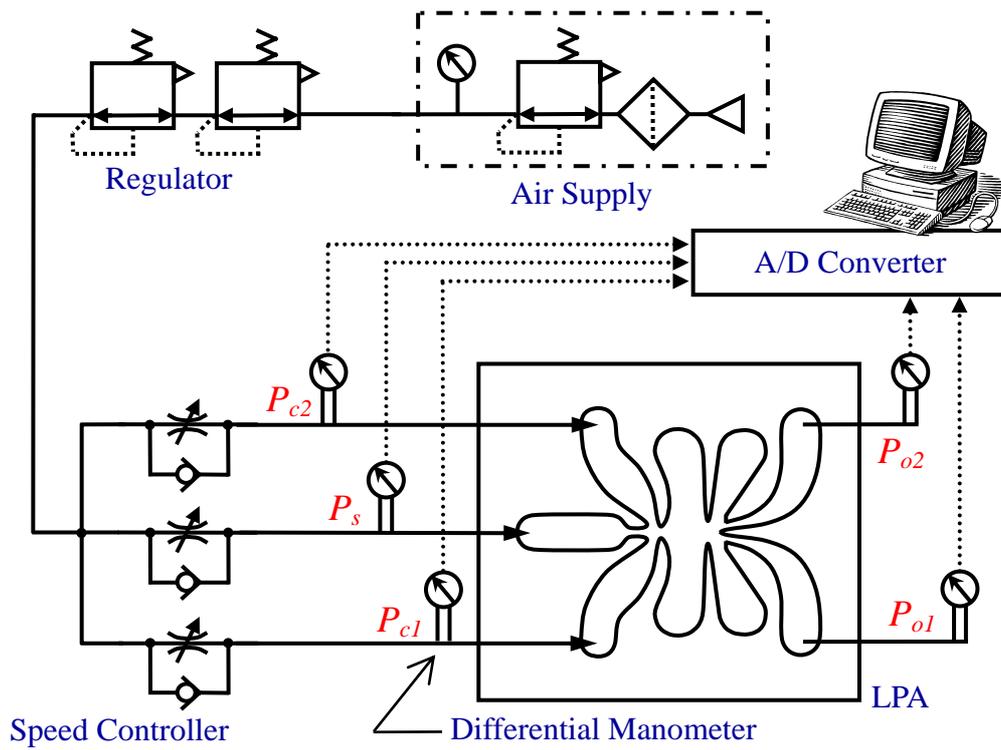


Fig.12 Photograph of Experimental Setup



P_s : 供給圧 P_c : 制御圧 P_{o1}, P_{o2} : 出力圧

$\Delta P_c = P_{c1} - P_{c2}$: 制御入力差圧 $\Delta P_o = P_{o1} - P_{o2}$: 出力差圧

Fig.13 System Configuration

4.2 基準となる LPA の動作特性実験

本研究で試作した LPA の特性を明らかにするために、まず、LPA×1S を試作したすべての LPA の基準モデルとし、LPA×1S の基本的な静特性実験を行った。また、参考にした LPA のカバープレートの形状が定められていなかったため、LPA×1 におけるカバープレートの形状による影響についても調査した。

4.2.1 半円形 LPA の静特性実験

【供給圧 1kPa のときの特性】

試作した LPA の基準モデルとなる LPA×1S の静特性実験を行った。

供給圧を 1kPa に設定したときの制御入力差圧 ΔP_c に対する出力差圧 ΔP_o の入出力特性を測定した。Fig.14 に、供給圧 P_s が 1kPa のときの LPA×1S の入出力特性を示す。このとき、零入力時 ($\Delta P_c = 0\text{Pa}$) に、あらかじめ与えておく制御圧 P_c は P_s の 5% と設定した。

ΔP_c を 0Pa から 300Pa、300Pa から 0Pa、0Pa から -300Pa、-300Pa から 0Pa と変化させてもヒステリシスは見られず、安定した動作を確認できた。また、 ΔP_c が -150Pa から 150Pa の範囲では線形動作を行い、それ以外の範囲では飽和することが分かった。

制御入力差圧対出力差圧曲線の直線部の勾配を圧力ゲイン G_p という⁹⁾。本研究では、以下、この圧力ゲインを、 ΔP_c が -100Pa から 100Pa の範囲の直線部を最小二乗法で近似して求める。圧力ゲインは、0.6 であった。

また、零入力時 ($\Delta P_c = 0\text{Pa}$) での圧力回復率に対する影響も調べた。圧力回復率は、零入力時の出力圧 P_{o1} 、 P_{o2} を平均した $\overline{P_o}$ を供給圧で割った値である。このときの圧力回復率 $\overline{P_o}/P_s$ は、8.7% であった。

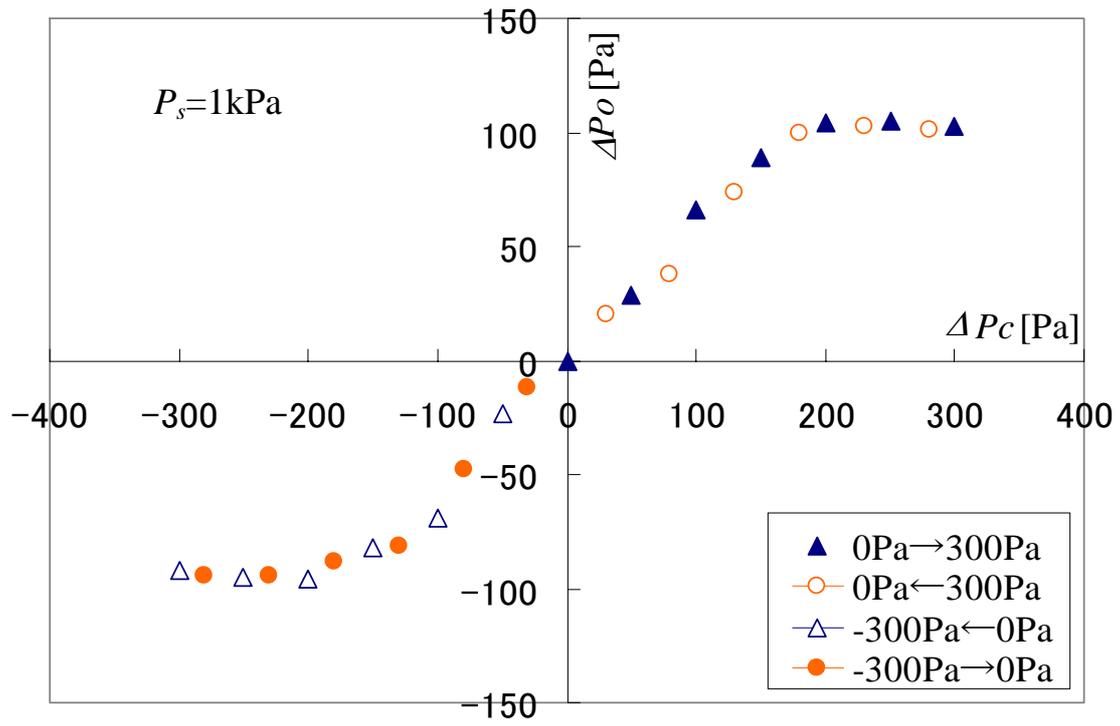


Fig.14 Static Characteristics for LPAx1S

【制御圧の変化による影響】

あらかじめ与えておく制御圧の大きさによる影響を調査した。一般的にフルイデックスは、制御圧の大きさに関係なく、制御入力差圧のみに影響するとされているが、制御圧は供給圧の15%以下が望ましいという報告もされている⁹⁾。本実験では、供給圧を1kPaに設定し、制御圧を供給圧の5%、10%、20%、30%と変化させた。Fig.15に、制御圧を変化させたときの入出力特性を示す。また、Table2にそのときの圧力ゲインを示す。本実験では、制御圧を変化させても圧力ゲインには変化が見られなかったが、20%以上に設定すると線形動作範囲の縮小、直線性にぶれがみられるなどの影響が見られた。Table3に、このときの圧力回復率を示す。5%と10%はほぼ同じで、20%を超えると圧力回復率が大きくなった。

あらかじめ与えておく制御圧の大きさは、圧力ゲインや直線性を考慮すると供給圧に対して、10%以下の微小な圧力であることが望ましく、その範囲以下であればフルイデックスの特性に影響しないことが分かった。

以下、あらかじめ与えておく制御圧の大きさを供給圧の5%とする。

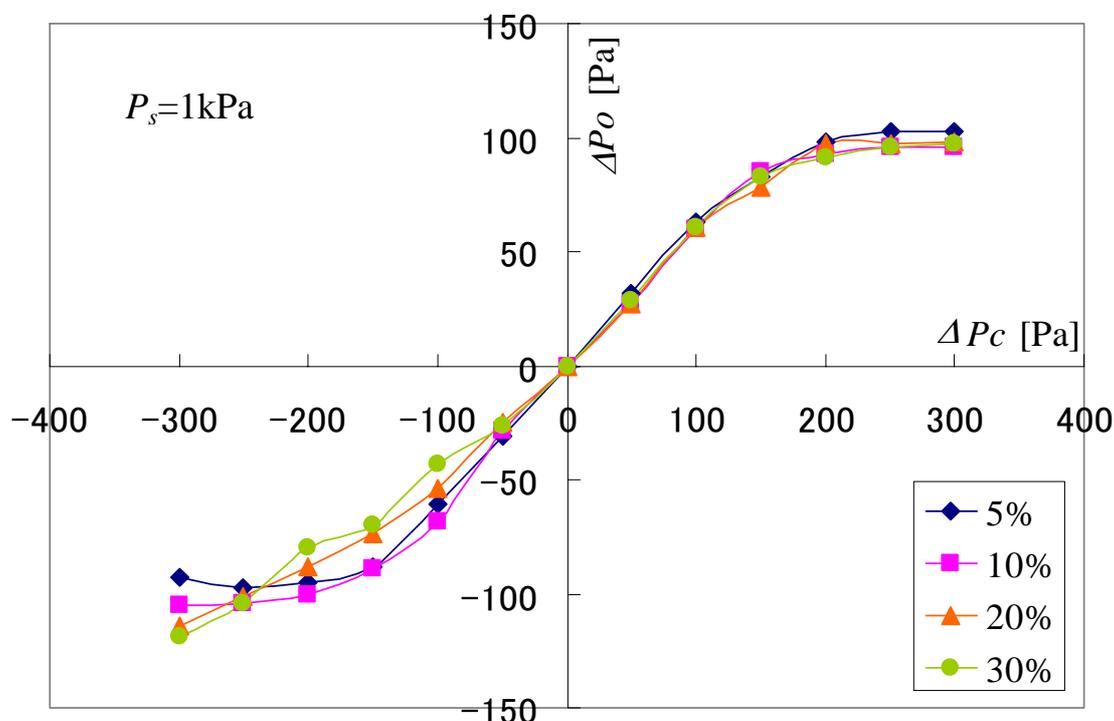


Fig.15 Static Characteristics for Control Pressure Change

Table2 Pressure Gain for Control Pressure Change

	$P_s \times 5\%$	$P_s \times 10\%$	$P_s \times 20\%$	$P_s \times 30\%$
G_p	0.6	0.6	0.6	0.5

Table3 Pressure Recovery Ratio for Control Pressure Change

	$P_s \times 5\%$	$P_s \times 10\%$	$P_s \times 20\%$	$P_s \times 30\%$
\overline{P}_o/P_s	9.2%	8.9%	9.5%	10.6%

($P_s=1\text{kPa}$, $\Delta P_c=0\text{Pa}$)

【供給圧の変化による影響】

供給圧の大きさによる影響も調査した．供給圧を 500Pa, 1kPa, 2kPa, 4kPa と変化させ，入出力特性を測定した．Fig.16 に，供給圧を変化させたときの入出力特性を示す．また，Table4 に，そのときの圧力ゲインを示す．供給圧が低いほうが，線形動作範囲は広くなることが分かった．また，500Pa と 1kPa を比較すると分かるように，供給圧を高くするに従い圧力ゲインが大きくなった．しかし，1kPa を超えると変化がなくなることが分かった．Table5 にそのときの，圧力回復率を示す．圧力回復率は，供給圧が高くなるにつれ大きくなることが分かった．

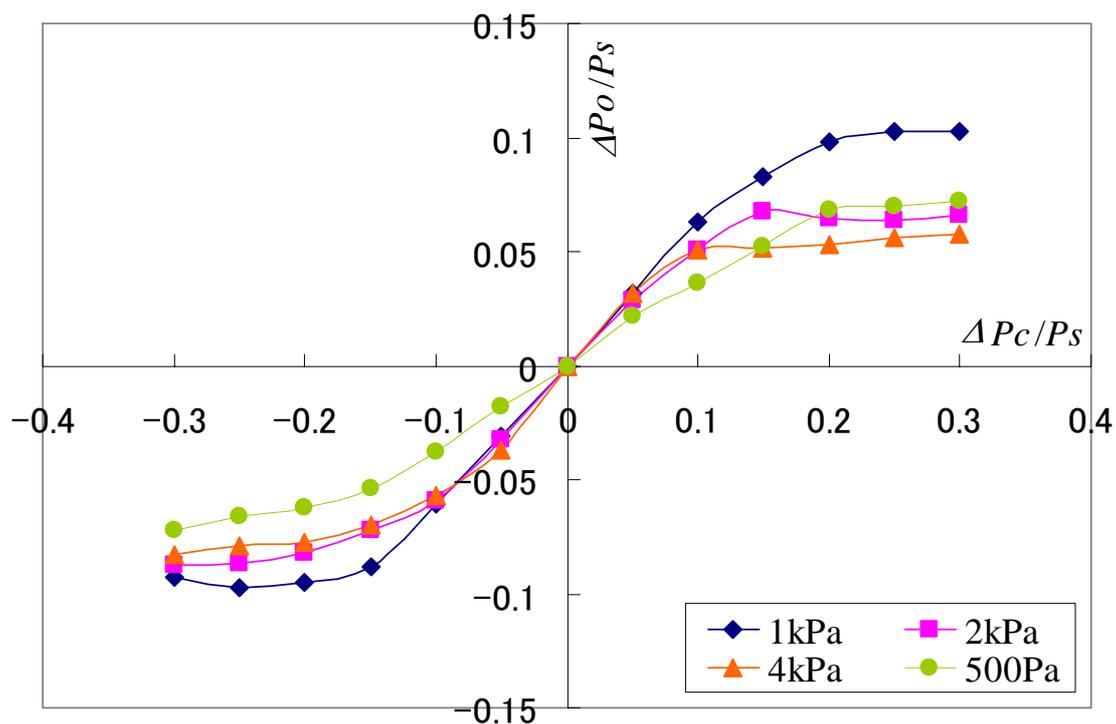


Fig.16 Static Characteristics for Supply Pressure Change

Table4 Pressure Gain for Supply Pressure Change

	500Pa	1kPa	2kPa	4kPa
G_p	0.3	0.6	0.6	0.6

Table5 Pressure Recovery Ratio for Supply Pressure Change

	500Pa	1kPa	2kPa	4kPa
\overline{P}_o/P_s	8.9%	9.2%	9.8%	9.9%

($\Delta P_c=0\text{Pa}$)

4.2.2 カバープレートの形状による影響

本研究で LPA を試作する際に、カバープレートの設計条件は示されていない。また、LPA のカバープレートによる影響は、今までにあまり報告されていない。そこで、基準となる LPA×1 においてカバープレートの形状変化による影響を調査した。供給圧を 1kPa に設定し、入出力特性を測定した。Fig.17 に、カバープレートの形状を変化させたときの入出力特性を示す。また、Table6 にそのときの圧力ゲインを示す。線形動作範囲には変化が見られなかった。圧力ゲインについては大きな変化があり、LPA×1S が 0.6、LPA×1C が 0.09 と約 7 倍もの違いが見られた。

また、Table7 に、そのときの圧力回復率を示す。圧力回復率にも大きな差が見られ、LPA×1S が LPA×1C よりも約 1.5 倍も大きかった。

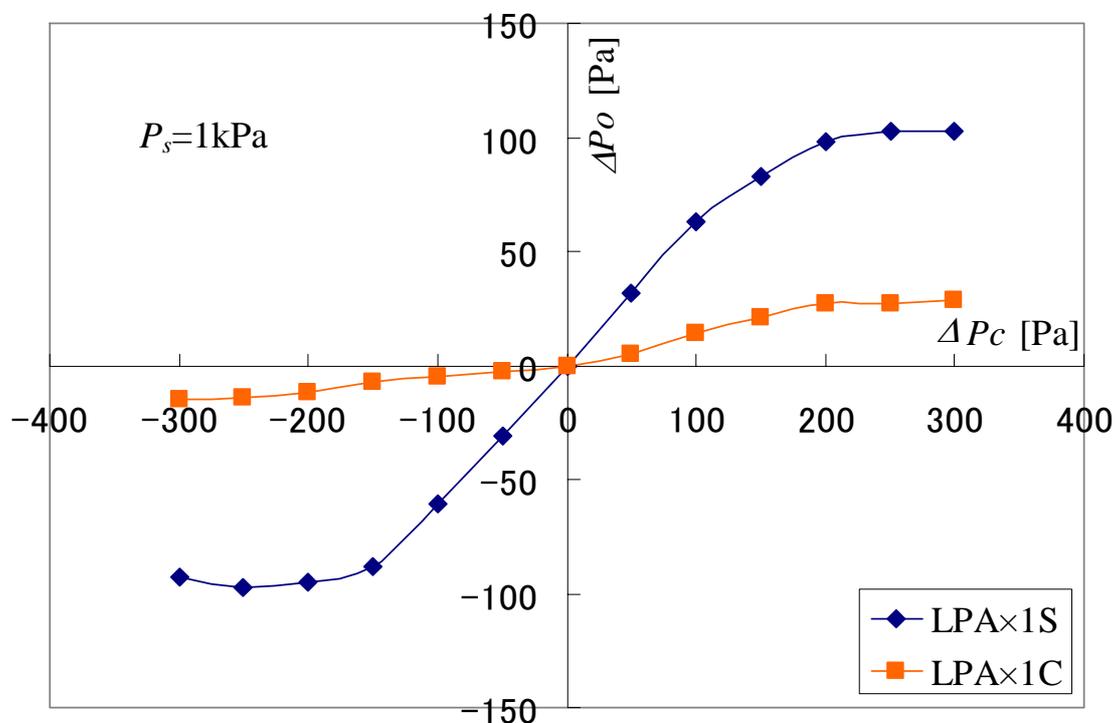


Fig.17 Static Characteristic for Cover Plate Change

Table6 Pressure Gain for Cover Plate Change

	LPA×1S	LPA×1C
G_p	0.6	0.09

Table7 Pressure Recovery Ratio for Cover Plate Change

	LPA×1S	LPA×1C
\overline{P}_o/P_s	9.2%	6.1%

($P_s=1\text{kPa}$, $\Delta P_c=0\text{Pa}$)

4.2.3 考察

本研究で試作したすべてのLPAの基準となるLPA×1の静特性実験を行った。LPAの特性は、供給圧が高いほうが圧力ゲインと圧力回復率が大きく、線形動作範囲も広くなると報告されている¹⁰⁾。本研究で試作したLPAの特性において、圧力ゲインと圧力回復率に関しては、同じ結果が得られたが、線形動作範囲については、供給圧が高いほうが狭くなるといった結果が得られた。また、文献9)で報告されているLPAの圧力ゲインは約6で、これに対して、本研究で試作したLPAの圧力ゲインは約0.6と、とても小さい値になってしまった。

これは、LPAの各部の寸法、又は形状の違いと思われる。清水らは寸法の形状による影響を調べることで圧力ゲインが高だけでなく、供給圧に対して動作範囲の広い素子の開発に成功している¹¹⁾。本実験でも、カバープレートの形状による影響を調査した。カバープレートの形状による影響は、今まで報告はされておらず、特性を左右する重要なパラメータとして認識されていなかったが、本実験で、約7倍もの圧力ゲインの違いが確認された。以上のように、LPAの形状の違いは特性に大きくかかわる。次回、試作の際にはこの点を考慮する必要がある。

また、製作方法の点からも挙げられる。本研究では、マイクロ光造形法を使用しているが、一般的に報告されているLPAはワイヤーカット放電加工法によるステンレス製のものである。光造形で試作したLPAの素材は樹脂であり、ワイヤーカット放電加工で製作したLPAよりも鋭いエッジがでない。このことは、カバープレートで流路を密閉する際に、隙間が出来る原因になる。推測であるが、この隙間が流路内の内部抵抗となり圧力ゲインの低下に関係しているのではないかと思われる。この問題を解決する手段としては、LPAを2点の部品で製作するのではなく、すべての部品を一体造形で製作してしまうことである。2点の部品で製作した理由は、光造形の製作過程における部品の洗浄を簡潔にするためである。しかし、この洗浄をする際に、エアダスタを用いたり、洗浄時間を変更したりして工夫をすれば、カバープレートも一体造形で製作することが可能と思われる。

4.3 LPA の縮尺による影響

本研究では、マイクロバルブに対してフルイディクスの応用を念頭においている。しかしながら、LPA を小形化させたときの特性は、製作上困難なためかあまり報告されておらず、その動作特性は未知である。そこで、LPA を小形化させたときの影響を調べることによりフルイディクスの有効性の評価を行った。

4.3.1 半円形 LPA の縮尺による影響

供給圧を 1kPa に設定して、LPA×1S よりも小さい LPA×0.8S、LPA×0.5S の入出力特性測定実験を行った。Fig.18 に、供給圧が 1kPa のときの入出力特性を示す。また、Table8 に、そのときの圧力ゲイン、Table9 に、そのときの圧力回復率を示す。LPA×1S と比較して LPA×0.8S は、線形動作範囲が広くなることが分かった。また、圧力ゲインと圧力回復率も大きくなることが分かった。しかし、LPA×0.5S のみに動作が不安定になり、発振現象と考えられる影響が見られた。発振現象は、供給圧を高くしすぎて層流域を超えた場合に起こる現象である。

そこで、供給圧を 500Pa にして、再度実験を行った。Fig.19 に、供給圧が 500Pa のときの入出力特性を示す。また、Table10 に、そのときの圧力ゲインを示す。供給圧が 1kPa のときに見られた LPA×0.5S の発振現象は、確認されなかった。LPA を小形化すると線形動作範囲も広くなり、圧力ゲインも大きくなることが分かった。供給圧が 500Pa のときの圧力回復率を Table11 に示す。小形化をしたほうが、圧力回復率は高くなることが分かった。

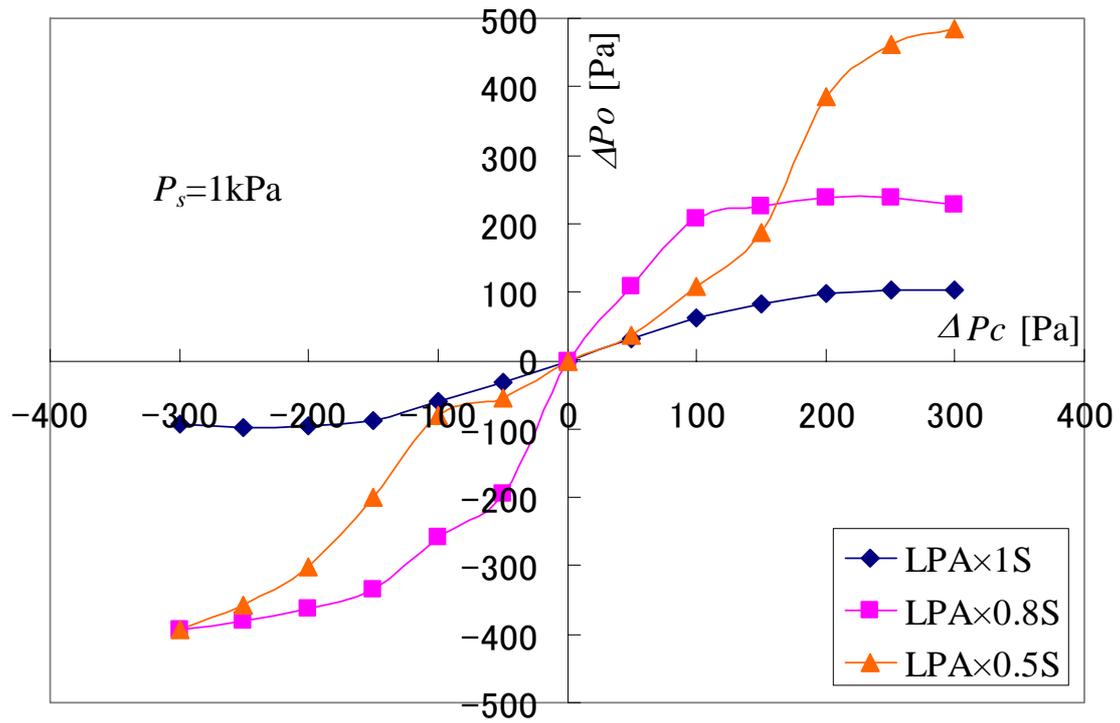


Fig.18 Static Characteristics for Scale Models (LPA_S, $P_s=1\text{kPa}$)

Table8 Pressure Gain for Scale Models (LPA_S, $P_s=1\text{kPa}$)

	LPA×1S	LPA×0.8S	LPA×0.5S
G_p	0.6	2.4	-

($P_s=1\text{kPa}$)

Table9 Pressure Recovery Ratio for Scale Models (LPA_S, $P_s=1\text{kPa}$)

	LPA×1S	LPA×0.8S	LPA×0.5S
\bar{P}_o/P_s	9.2%	17.4%	- %

($P_s=1\text{kPa}$, $\Delta P_c=0\text{Pa}$)

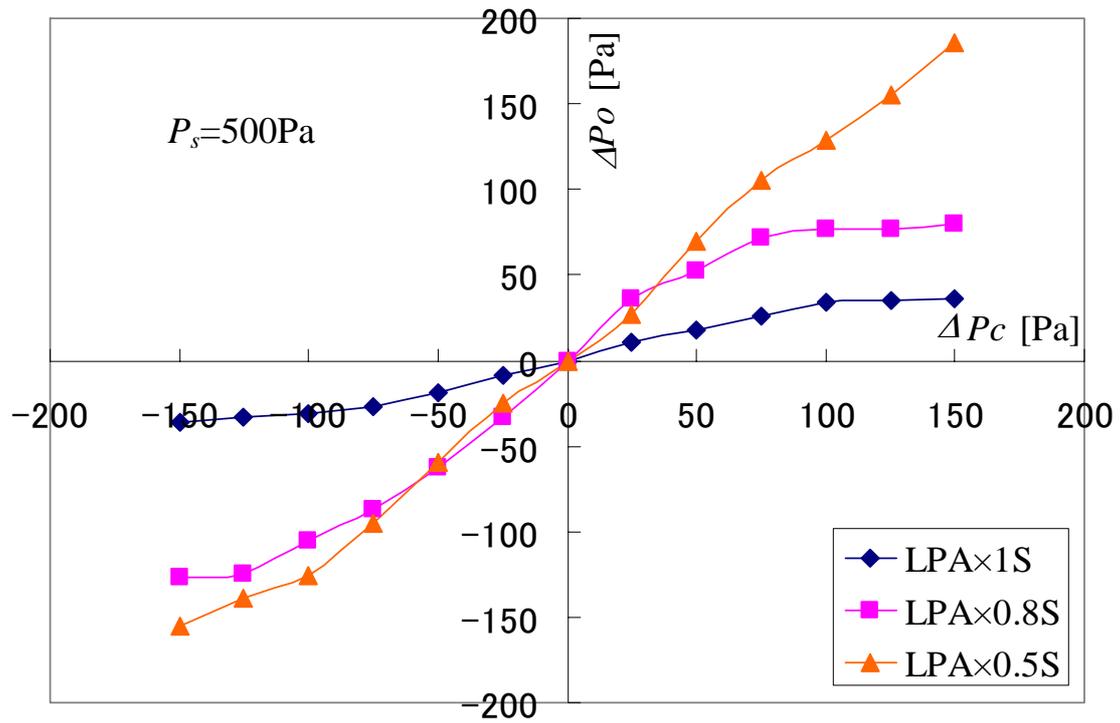


Fig.19 Static Characteristics for Scale Models (LPA_S, $P_s=500\text{Pa}$)

Table10 Pressure Gain for Scale Models (LPA_S, $P_s=500\text{Pa}$)

	LPA×1S	LPA×0.8S	LPA×0.5S
G_p	0.3	1.0	1.2

($P_s=500\text{Pa}$)

Table11 Pressure Recovery Ratio for Scale Models (LPA_S, $P_s=500\text{Pa}$)

	LPA×1S	LPA×0.8S	LPA×0.5S
\bar{P}_o/P_s	8.9%	14.1%	17.7%

($P_s=500\text{Pa}$, $\Delta P_c=0\text{Pa}$)

4.3.2 円形 LPA の縮尺による影響

供給圧を 1kPa に設定して、LPA×1C よりも小さい LPA×0.8C、LPA×0.5C の入出力特性測定実験を行った。Fig.20 に、供給圧が 1kPa のときの入出力特性を示す。また、Table12 に、そのときの圧力ゲインを示す。小形化すると、圧力ゲインが大きくなり、線形動作範囲も広がることが分かった。

また、Table13 に、このときの圧力回復率を示す。小形化をすると圧力回復率が高くなることが分かった。

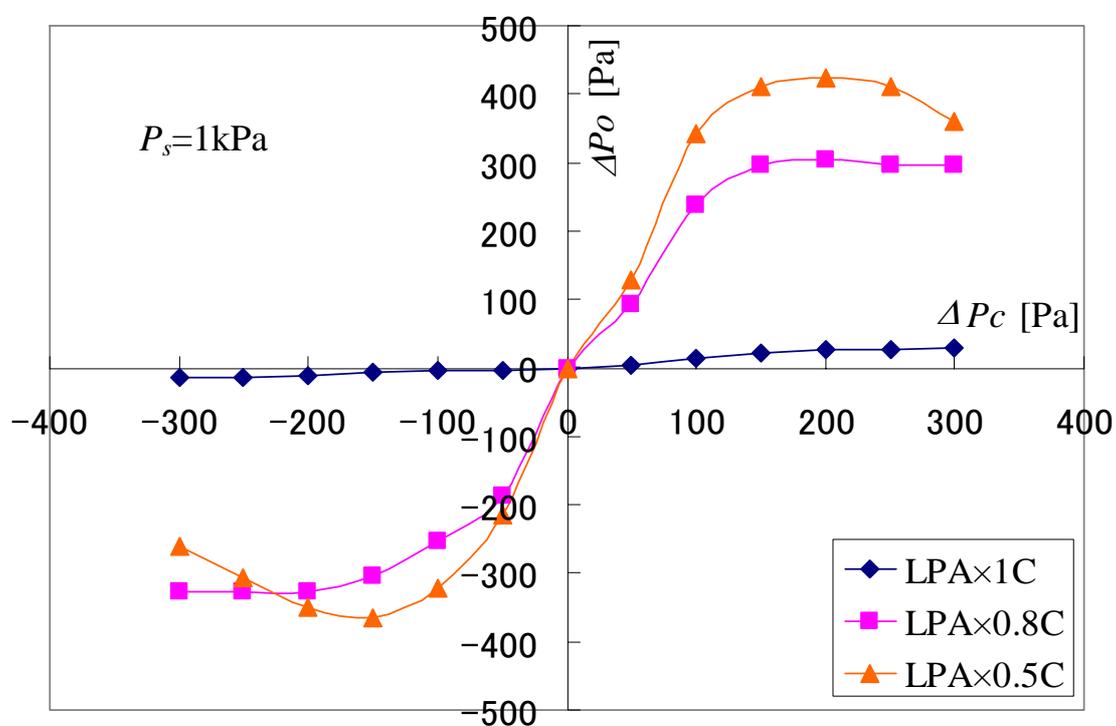


Fig.20 Static Characteristics for Scale Models (LPA_C, $P_s=1\text{kPa}$)

Table12 Pressure Gain for Scale Models (LPA_C, $P_s=1\text{kPa}$)

	LPA×1C	LPA×0.8C	LPA×0.5C
G_p	0.1	2.5	3.3

Table13 Pressure Recovery Ratio for Scale Models (LPA_C, $P_s=1\text{kPa}$)

	LPA×1C	LPA×0.8C	LPA×0.5C
\bar{P}_o/P_s	6.1%	18.1%	27%

($P_s=1\text{kPa}$, $\Delta P_c=0\text{Pa}$)

4.3.3 考察

LPA を小形化させたときの影響を、半円形 LPA と円形 LPA の 2 種類を用いて調査した。実験結果より LPA を小形化させても正常に動作することが確認された。小形化させると $LPA \times 0.8$, $LPA \times 0.5$ とともに、線形動作範囲が広がり、圧力ゲイン、圧力回復率ともに増加するといった、優れた結果が得られた。

$LPA \times 0.5S$ (半円形 LPA) の素子において、供給圧が 1kPa のときに発振と思われる影響が見られ、供給圧に対する動作範囲が狭くなったことが確認できた。しかし、 $LPA \times 0.5C$ (円形 LPA) は、供給圧が 1kPa のときでも発振と思われる現象は確認されず、正常に動作した。また、 $LPA \times 0.5C$ のこのときの圧力ゲインは、今回測定された圧力ゲインの中で最大であった。 $LPA \times 1$ では、カバープレートが円形の方は、圧力ゲインや圧力回復率が小さいなどの欠点がみられたが、小形化させると円形の方が圧力ゲインや圧力回復率が大きくなるといった結果が得られた。今後は、小形化に向けてカバープレートのパラメータを含めた素子特性の理論的解明を行う必要がある。このカバープレートの影響が理論的に解明されれば、マイクロ化に適した形状のフルイディクスが開発できる可能性は十分にあると思われる。

5. 結論

本研究では、マイクロバルブの開発を目的としている。そこで、フルイデックスを用いたマイクロバルブの有効性を検討した。フルイデックスは、多段結合、積層化が容易な点から、マイクロ化に適した構造である。素子内流れに相似則が成り立つといわれているが、本実験より、小形化させたLPAにおいても正常な動作を確認できた。また、小形化していくと線形動作範囲が広がり、圧力ゲイン、圧力回復率ともに増加するといった利点が見られた。欠点として、供給圧に対する動作範囲が狭くなったが、これはカバープレートのなどの形状を変えるなどして、克服できる可能性は十分にある。以上のことから、本研究によりフルイデックスはマイクロバルブに有望であるといえる。

【今後の展望】

フルイデックスは、まだ確立された技術ではない。カバープレートの形状による影響は、今まで報告はされておらず、特性を左右する重要なパラメータとして認識されていなかったが、本実験で、そのカバープレートの形状による違いからも特性に影響が出てくることが分かった。特性を支配すると考えられる寸法形状による影響を更に解明することで、よりマイクロ化に適したフルイデックスを開発できると思われる。

また、放電加工のような微細加工技術を用いてより微細な流路を形成させ、フルイデックスを多段結合させれば、より小型でパワーのあるマイクロバルブを開発できる可能性が期待される。

本研究では、制御ポートに空気を用いたが、空気ではなく他の手段（例えば、マイクロ世界で有効的な、熱や表面張力など）に変えることで、フルイデックスを更に応用させたマイクロメカトロデバイスの開発が可能であると思われる。

謝辞

本研究で使用した LPA の設計要素に関する情報は、明治大学理工学部機械情報工学科 小山 紀 教授の提供によるものであり、この場を借りてお礼申し上げます。また、研究を行うにあたり、多大な御支援、御指導をしていただいた法政大学工学部機械工学科 田中 豊 教授をはじめ、多くの助言や助力をしていただいた竹村直樹君、中村直人君、石倉聖也君に心からお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 北原時雄, 石川雄一: マイクロマシン技術と応用, (株) CMC 出版
- 2) マイクロマシン技術総覧編集委員会委員長 樋口俊郎: マイクロマシン技術総覧, (株) 産業技術サービスセンター
- 3) 横田眞一, 貞本敦史, 近藤豊, 大坪泰文, 枝村一弥: 電界共役流体 (ECF) を応用したマイクロモータ (ステータ電極 (SE) 形マイクロ ECF モータの提案), 機論 66-642C, (2000), p.627
- 4) 横田眞一, 根本敏之, 近藤豊, 大坪泰文, 枝村一弥: 電界共役流体 (ECF) を応用したマイクロモータ (ロータ電極 (RE) 形マイクロ ECF モータの提案), 機論 66-651C, (2000), p.3799
- 5) 江刺正喜, 藤田博之, 五十嵐伊勢美, 杉山進: マイクロマシーニングとマイクロメカトロニクス, (株) 培風館
- 6) (社) 日本油空圧学会編: 新版 油空圧便覧, オーム社
- 7) Toshihiro YOSHIMITSU, Osamu OYAMA, Keijiro YAMAMOTO : Characteristic of Opto-fluidic Control System, Proceeding of the Fourth JHPS International Symposium on Fluid Power Tokyo'99, 431/436, (1999).
- 8) 山本圭治郎: 最近のフルイデイクス-層流フルイデイクスを中心として-, 油圧と空気圧, 13-5, (1982), pp38-42
- 9) 尾崎省太郎, 原美明, : 純流体素子入門, 日刊工業新聞社
- 10) 佐藤勝俊, 畑中浩: 層流比例増幅素子の動特性, 計測自動制御学会論文集, 20-12, (1984), pp.1156-1160
- 11) 清水久記, 佐藤勝俊, 畑中浩: 層流比例増幅素子の圧力ゲインと動作範囲に及ぼす寸法形状の影響, 計測自動制御学会論文集, 22-12, (1986), pp.1318-1323

付録 A 微差圧計 KL12 の電流 - 電圧変換回路

本実験で用いた KL12 小形微差圧トランスミッタ（長野計器製）は，出力が電流であるため，A/D ボード（インターフェース製 PCI-3133）に取り込む際に，電圧に変換しなければならない．Fig.A1 に，電流 - 電圧変換回路を示す．構成要素は，OP アンプ（OP07C）と炭素皮膜抵抗 R （ 220Ω , $1/2W$ ）である．

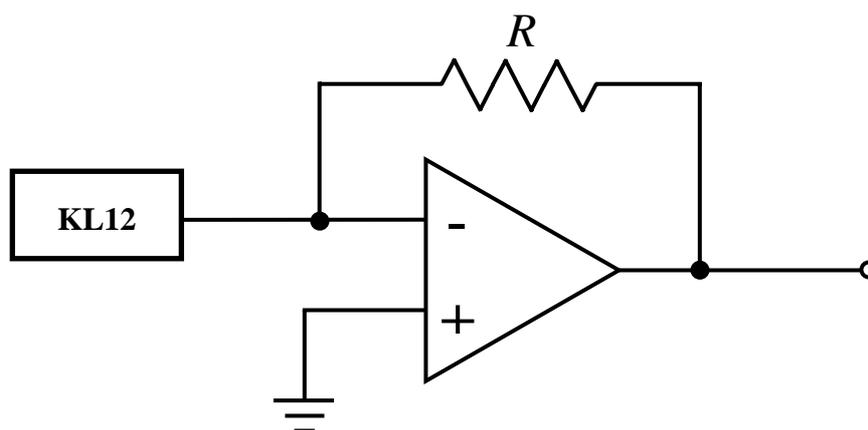


Fig.A1 I/V Converter

付録 B マイクロ放電加工機

本大学において、マイクロ・ナノテクノロジー研究センターが 2004 年 4 月より開設された。私たちの研究チームでは、マイクロマシンの開発を目的としている。そこで、本センターには、マイクロ光造形機、マイクロブラスト加工機、マイクロ放電加工機が納入された。本節では、その中でもフルイディクスの更なる小形化を行う際に、役立つと思われる放電加工機について述べる。

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。Fig.B1 に、マイクロ放電加工の加工原理を示す。

放電加工は、サブミクロンの面粗さの実現や非接触加工などの優れた特徴を持っている。また、電極の形がそのまま転写されるので、複雑形状を形成することができる。Fig.B2 に、放電加工の加工例を示す。

本センターで納入された放電加工機は、松下電器産業（株）製で、最小 5 ミクロンの穴加工が可能であり、3 次元形状も高精度に加工できるといった特徴を持っている。Fig.B3 に、そのマイクロ放電加工機を示す。

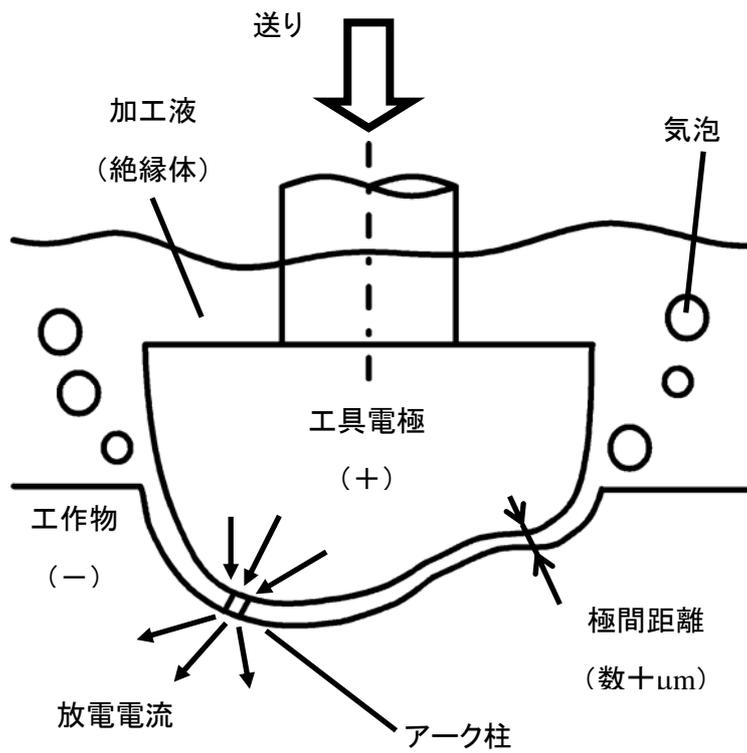


Fig.B1 Principle of Electrical Discharge Machining (EDM)

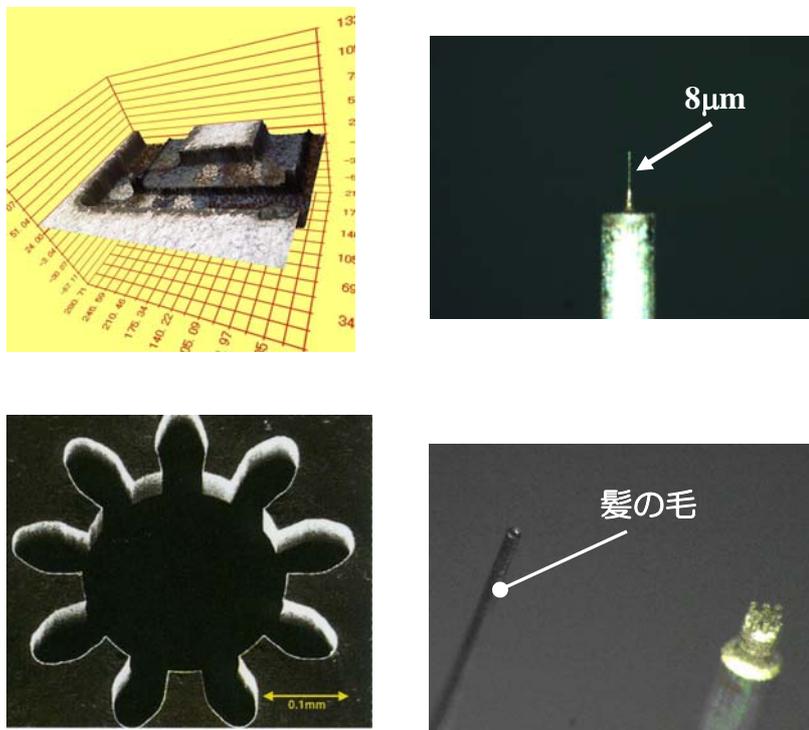


Fig.B2 Models with EDM



仕様

- ・最小加工穴径 : 5 μ m
- ・表面粗さ : Rmax 0.1 μ m
- ・外形寸法 : 700 \times 550 \times 760mm
- ・加工範囲 : (X)200, (Y)50, (Z)10mm
- ・加工槽寸法 : 310 \times 150 \times 45mm
- ・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)

Fig.B3 SP-100 (EDM)

付録 C 修士論文審査会の質疑応答

A) LPA はスケーリングに強いとあるが、どのような構造ならスケーリングに強いのか？ 相似則が成り立つことは、わかっているのか？

Answer

今までの LPA のサイズ (LPA×1 の大きさ) においては、相似則が成り立つことが分かっている。しかし、構造のどの部分が影響するのかは、分からない。

従来のサイズをさらに縮小した LPA (LPA×0.8 や LPA×0.5 の大きさ) においては、他の研究論文においてもあまり報告されておらず、相似則が成り立つことは定かではなかった。これは、製作上、小形化することが困難であったためと思われる。しかし、半導体製造技術の進歩により、小さい LPA の製作が容易にできるようになった。本研究では、相似則が成り立つことを確認することも含めて、フルイディクスの有効性の調査をした。

B) 飽和しているが、何の影響なのか？

Answer

これは、制御入力圧力の影響と思われる。制御入力圧力が大きくなってしまい主噴流が出力ポートの受流口から触れてしまったためと思われる。

C) 目標は、圧力をコントロールするのか、流量をコントロールするのか？

Answer

本研究では、圧力をコントロールすることを目標とした。しかし、これは、フルイディクスのアプリケーションによって変わってくると思われる。