T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	MEMS技術を用いた交流圧力駆動ERマイクロアクチュエータシステムの研究
Title(English)	
著者(和文)	三好 智也
Author(English)	Tomoya Miyoshi
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第10538号, 授与年月日:2017年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:吉田 和弘,金 俊完,進士 忠彦,只野 耕太郎,髙山 俊男
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第10538号, Conferred date:2017/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

東京工業大学

平成二十八年度 学位論文

ＭＥＭＳ技術を用いた交流圧力駆動
ＥＲマイクロアクチュエータシステムの研究

メカノマイクロ工学専攻

三好　智也

目次

第 1 章 緒論 …… 1

1.1 研究背景 …… 1
1.2 機能性流体 …… 2
1.3 交流圧力を用いた流体駆動システム …… 3
1.4 本研究の目的 …… 3
1.5 本論文の構成 …… 4

第 2 章 交流圧力駆動 ER マイクロアクチュエータシステムの提案 …… 6

2.1 緒言 …… 6
2.2 ERF …… 6
2.2.1 粒子分散系 ERF …… 6
2.2.2 均一系 ERF としてのネマティック液晶 …… 7
2.3 ER マイクロバルブ …… 10
2.4 交流圧力源を用いた ER マイクロアクチュエータシステムの提案 …… 14
2.4.1 従来の ER マイクロアクチュエータシステム …… 14
2.4.2 交流圧力駆動 ER マイクロアクチュエータシステムの提案 …… 16
2.5 交流圧力源を用いた ER 屈曲アクチュエータシステムの理論解析 …… 21
2.6 結言 …… 27

第 3 章 ラージモデルによる動作原理検証 …… 28

3.1 緒言 …… 28
3.2 原理検証用ラージモデルの試作 …… 28
3.2.1 交流圧力源ラージモデルの試作 …… 29
3.2.2 ER バルブの試作 …… 30
3.2.3 ER 屈曲アクチュエータラージモデルの試作 …… 34
3.3 ラージモデルによる特性実験 …… 35
3.3.1 変位特性と最大発生力 …… 37
3.3.2 並列駆動実験による多自由度化の検証 …… 40
3.4 結言 …… 43

第 4 章　MEMS 技術を用いた 1 自由度 ER 屈曲アクチュエータ … 45

4.1　緒言 …… 45
4.2　液圧屈曲アクチュエータ部の試作 …… 45
4.2.1　FEM 解析に基づいた液圧屈曲アクチュエータ設計 …… 47
4.2.2　高アスペクト比３Ｄ構造のための PDMS 成形プロセス …… 55
4.3　シリコンＥＲマイクロバルブの試作 …… 60
4.3.1　高粘度 ERF 特性実験 …… 61
4.3.2　シリコン異方性エッチングによる微細加工 …… 64
4.4　1 自由度ＥＲ屈曲アクチュエータ …… 67
4.4.1　1 自由度 ER 屈曲アクチュエータの構築 …… 67
4.4.2　1 自由度 ER 屈曲アクチュエータの特性実験 …… 69
4.5　結言 …… 73

第 5 章　2 自由度 ER 屈曲アクチュエータシステム …… 75

5.1　緒言 …… 75
5.2　2 自由度ＰＤＭＳアクチュエータ部 …… 76
5.2.1　設計と試作 …… 76
5.2.2　空気圧を用いた動作試験 …… 79
5.2.3　製作プロセスの改良 …… 81
5.3　バルブ・ポンプ搭載形マイクロ流体チップの試作 …… 82
5.3.1　FEM シミュレーションによる設計 …… 83
5.3.2　ER マイクロ流体チップの製作プロセスの検討 …… 88
5.3.3　マイクロ交流圧力源の試作と特性実験 …… 91
5.3.4　ER マイクロ流体チップの試作 …… 97
5.4　2 自由度 ER 屈曲アクチュエータの特性実験 …… 100
5.5　結言 …… 104

第 6 章　結論 …… 105

6.1　本論文のまとめ …… 105
6.2　今後の課題 …… 107

付録

参考文献

謝辞

第 1 章　緒論

1.1　研究背景

近年, 閉鎖的で狭い空間内, 例えば小径管路内などにおいて自立駆動される産業用のマイクロロボットが求められている[1-5]．それは，マイクロロボットはその小ささを活かして産業設備における狭く，アプローチが困難な場所の点検やメンテナンスに適しているからである. 発電プラントや化学工業, 航空機などの配管設備内部における点検, メンテナンスなどの作業は, 設備運用上のコスト, 安全面の観点で非常に重要であるが，人間の作業員が手動でそれらを行うにあたって設備の稼働を停止させ配管などを分解して作業を行う必要性があり，作業者への危険を伴う. これに対し, 管内作業用マイクロロボットを用いてメンテナンスを行う場合, 配管を分解せずにその内部をメンテナンスできるため, メンテナンス期間の短縮，コスト削減とともに作業者の安全確保が期待できる.

上記のような細管内メンテナンス用のマイクロロボットには，図 1.1 に示すような 3 次元的に入り組んだ細管内を自由に走行し，かつ作業を行うための駆動力と自分の位置・姿勢を維持するための大きな保持力を発生させるため, さらにマイクロハンドなどの搭載機器のために，高パワーの小形アクチュエータを多数搭載した多自由度アクチュエータシステムが求められる．さらに細管内などの狭い空間で作業するためにマイクロロボットはサイズ制限を有するため, 搭載するアクチュエータシステムには高いパワー密度が要求される. つまり, 高パワー密度を有するマイクロアクチュエータシステムが必要とされる.

ところで，実際の産業の場面において高いパワー密度を有するアクチュエータシステムは，液圧アクチュエータシステムの一種である油圧アクチュエータシステムである．さらに，図 1.2 に示すように液圧，静電，電磁，圧電などの各種アクチュエータの微小化特性の理論的検討が行われ，アクチュエータの代表長さが 10μm から 10mm の領域において容積変化を利用した容積形液圧アクチュエータのパワー密度の点における優位性が示されている[6]. 液圧アクチュエータシステムの高いパワー密度を利用することができれば，細管内を自在に移動し作業を行うパワフルなマイクロロボットの実現が可能となるが，現行の油圧系のシステムを単純にサイズダウンすることは非常に難しい．それは,

①液圧システムの制御バルブのマイクロ化が困難

②マイクロ化による液圧配管部におけるパワー損失の増大

が主な問題となるからである. これらの課題は, 機能性流体と交流圧力を用いた流体制御システムを応用すれば，解決できると考えられる.

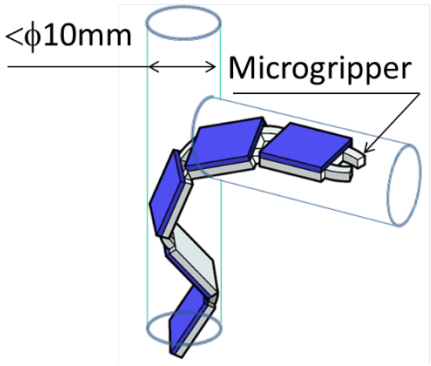


Fig. 1.1 Schematic of in-pipe working microrobot using hydraulic power

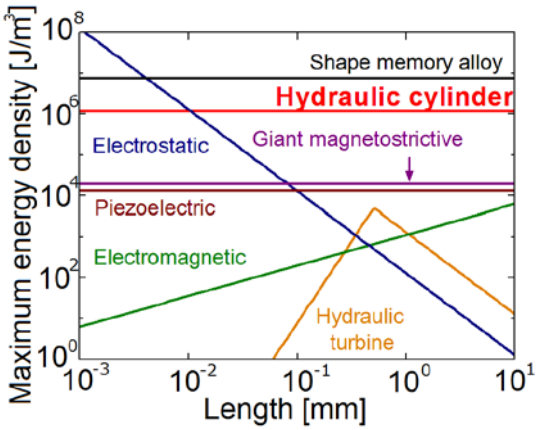


Fig. 1.2 Comparison of characteristics of miniaturization

1.2　機能性流体

機能性流体とは電界や磁界などを印加することにより特有の機能を発現する流体であり，電界印加によりその見かけの粘度が可逆的に変化する ERF（Electro Rheological Fluid，ER 流体），磁界印加により ERF と同様に粘度変化が発生する MRF （Magneto Rheological Fluid，MR 流体），電界印加によりジェット流が発生する ECF（Electro Conjugate Fluid，電界共役流体）などがある [7]．これら機能性流体によって流体駆動システムのマイクロ化が可能となり，例えば MRF の場合外部磁場の印加のみによって流体制御が行えるため，高パワー密度を有する液圧システムが実現できる．

1.1 節で述べた課題①は，ERF を動作流体として用いたマイクロバルブによって克服できる．ERF が有する電界印加によりその見かけの粘度が増大する性質を利用して流体制御が可能である（詳細は 2 章で述べる）． 圧力，流量などを制御したい場合，流路中に電極を設置して流動する ERF に電界印加するだけで機械的可動部無しで流体制御が可能となる．機械的可動部がないため，機械部品

同士の摩擦，磨耗などが存在せず安定した動作が期待でき，そのシンプルな構造は MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)技術などの再現性が高い微細加工によるシステムの構築において非常に有利となる．それらの優れた微小化特性を利用した ERF を動作流体とする液圧マイクロアクチュエータシステムである ER マイクロアクチュエータシステムが現在までに様々開発されてきた [8-10].

1.3　交流圧力を用いた流体駆動システム

複数のアクチュエータを搭載して多自由度を有するシステムの構築のために，空気振動を用いた空気圧アクチュエータシステムが研究されている．音響バルブ [11]や共振バルブ [12]が開発されており，それらは特定の周波数の空気振動によって独立に開閉する特性を有しており，複数の周波数を用いることでそれと同数の空圧バルブをそれぞれ独立して制御可能である．これらの研究では電気配線が不要な小形の流体アクチュエータシステムが実現されており，空気振動のような交流圧力を用いることで流体駆動システムがシンプルかつコンパクトに構築可能であることを示している．しかし，上記の空気圧アクチュエータシステムでは高出力化と小形化に限界があり，液圧を用いた交流圧力による流体駆動システムの構築が望ましい．

1.2 節で述べたように，機能性流体 ERF を用いるとマイクロアクチュエータシステムの実現に有利であるが，多自由度動作が可能なマイクロロボットへの適用となると 1.1 節の②のパワー損失が課題となる．従来のシステムでは動作流体 ERF をマイクロポンプで循環させ流量，圧力を各アクチュエータに供給する．そのとき，液圧アクチュエータ 1 個ごとに動作流体の供給と戻り用の液圧配管が 2 本ずつ必要となる．そのため，複数のアクチュエータを搭載した多自由度なマイクロロボットにおいては，液圧配管の占有する体積が膨大なものとなる．さらに，液圧アクチュエータシステムのマイクロ化のために機能性流体 ERF を使用するとなれば，一般に ERF は水と比較して高粘度を有するため，配管部でのパワー損失が大きなものとなる．

以上のことから，マイクロ化に適しパワー損失を低減させる新動作原理の交流液圧駆動のマイクロアクチュエータシステムが求められる．

1.4　本研究の目的

本研究では，上述のような研究背景を踏まえて，1 本の液圧配管のみで動作流体の供給･戻りが可能で，液圧配管側とアクチュエータ側の動作流体を水と ERF でそれぞれ分離してパワー損失を低減させる交流圧力駆動多自由度 ER マイク

ロアクチュエータシステムを提案, 開発し, 微小領域で作業を行う多自由度マイクロシステムに応用することを目的とする.

まず, 新動作原理の液圧アクチュエータシステムを提案し, 簡単な理論解析を行う. 次に, 交流圧力駆動 ER マイクロアクチュエータシステムの動作原理検証を行う．原理検証用として従来の機械加工と手作業による組み立てにより試作したラージモデルを用いて特性実験を行う. さらに, マイクロサイズでのシステム構築のために MEMS 技術を用いた製作プロセスを提案，開発する．開発した製作プロセスにより試作した PDMS 製アクチュエータ部とシリコン微細加工により製作した ER マイクロバルブを有する 1 自由度 ER 屈曲アクチュエータシステムを構築して実験的にその特性を評価する. 最後に, マイクロ交流圧力源を搭載した 2 自由度 ER 屈曲アクチュエータシステムを試作して実験的に特性を評価し，提案するシステムの妥当性を明らかにする.

1.5　本論文の構成

本論文は 6 章より構成されている．フローチャートを図 1.3 に示す.

第 1 章「緒論」では，本研究の背景と目的および論文の構成を述べている.

第 2 章「交流圧力源駆動多自由度 ER マイクロアクチュエータシステムの提案」では，ERF, ER マイクロバルブ，および ER マイクロアクチュエータについて説明し，従来の成果と課題について記述し，交流圧力駆動多自由度 ER マイクロアクチュエータシステムの提案と理論解析を行う.

第 3 章「ラージモデルによる動作原理検証」では，第 2 章で提案したシステムの一種である交流圧力駆動 ER 屈曲アクチュエータシステムの概要を示し，そのシステムの動作原理を実験的に検証する．動作原理検証のためにシステムの構成要素である交流圧力源，液圧アクチュエータ，ER マイクロバルブのラージモデルを従来の機械加工を用いて試作する．試作したラージモデルを用いて液圧アクチュエータシステムの実験系を構築し特性実験を行い，その動作原理を確認する.

第 4 章「MEMS 技術を用いた 1 自由度 ER 屈曲アクチュエータの試作と特性実験」では，第 3 章で原理検証を行った交流圧力駆動 ER 屈曲アクチュエータシステムのマイクロサイズでの実現のために，MEMS 技術を用いた 1 自由度 ER 屈曲アクチュエータの提案と試作，特性評価を行う．まず，マイクロシステムに適する ERF の選定のための特性実験を行う．1 自由度 ER 屈曲アクチュエータシステムの要素である PDMS 屈曲アクチュエータ部と ER マイクロバルブ

の製作プロセスの提案, 試作を行い 1 自由度 ER アクチュエータの構築を行う．試作した実験デバイスを用いて駆動実験を行い，実験的にその特性を評価する．

第 5 章「2 自由度 ER 屈曲アクチュエータシステムの試作と特性実験」では，交流圧力源を含めたシステム全体のマイクロサイズでの試作および多自由度アクチュエータシステムの構築のために, 2 自由度 ER 屈曲アクチュエータシステムの実現を図る．第 4 章で開発された PDMS 成形プロセスを用いて可動部長さ 1.9mm の 2 自由度 PDMS 屈曲アクチュエータ部を試作し，空気圧試験によりその 2 自由度動作を確認する．また，交流圧力源と ER マイクロバルブを 1 チップ上に搭載したシリコン流体チップを試作し，そのマイクロ交流圧力源の特性を検証する．また，2 自由度 PDMS アクチュエータ部とシリコン流体チップによって 2 自由度 ER 屈曲アクチュエータシステムを構築し，ERF を動作流体とした駆動実験によりその特性を明らかにする．

第 6 章「結論」では，本論文で得られた結果を述べ，今後の課題を挙げている．

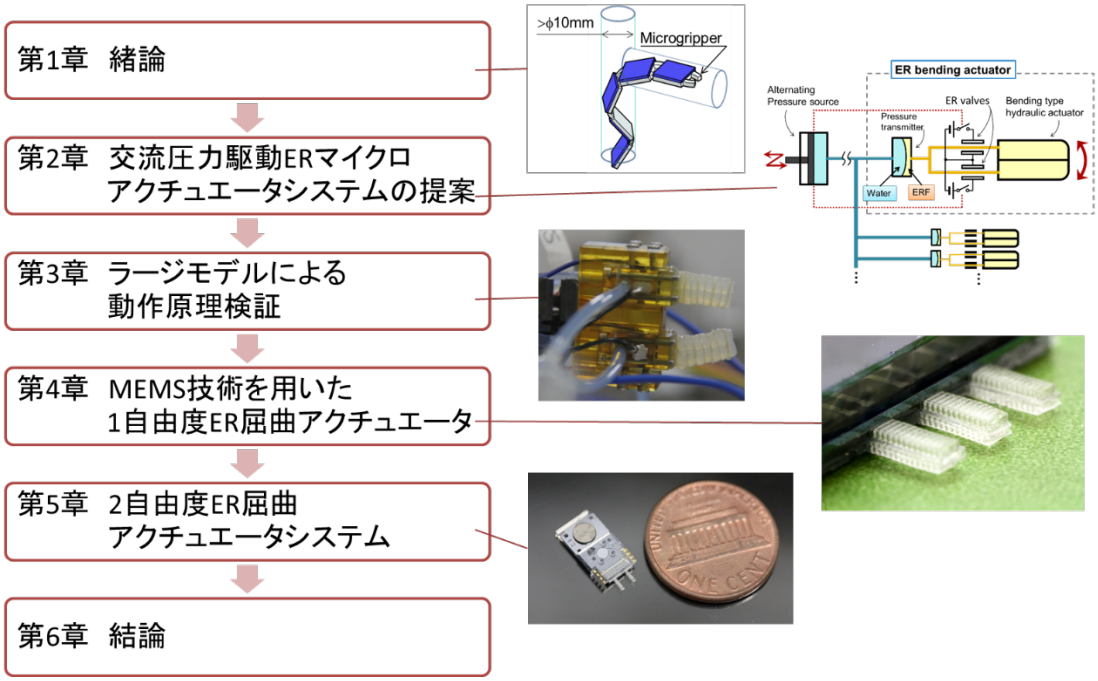


Fig. 1.3 Flow chart of this paper

第 2 章　交流圧力源駆動多自由度 ER マイクロアクチュエータシステムの提案 (13)

2.1　緒言

高いパワー密度を有し，産業用マイクロロボットへの応用が有望である液圧マイクロアクチュエータシステムの主な課題は,

①制御バルブのマイクロ化

②マイクロ化と多自由度化に伴う液圧配管部でのパワー損失の低減

の 2 点である.

これら 2 点の課題解決のために，本章では機能性流体 ERF を用いた新動作原理の液圧マイクロアクチュエータシステムの提案を行う. まず, 機能性流体 ERF として使用するネマティック液晶についての概要と機能性流体としての特性について述べた後に, ネマティック液晶を動作流体とした制御バルブである ER マイクロバルブについて従来の開発状況をふまえて説明する．そして，従来の ER マイクロアクチュエータシステムについて説明しその課題点を明らかにした後に，提案する交流圧力駆動 ER マイクロアクチュエータシステムの動作原理と利点，簡易モデルなどを用いた理論解析結果について述べる.

2.2　ERF

ERF（Electro-Rheological Fluid: 電気粘性流体，ER 流体）とは，印加電界により見かけの粘度を制御できる流体で，機能性流体の一種である．電界の印加による ERF の粘性の変化は ER 効果と呼ばれる．ERF は流体中の分散粒子の有無により，媒質である流体中に微細粒子を分散させて機能性を持たせた粒子分散系 ERF と流体自身が機能性を有する均一系 ERF と呼ばれるものの 2 種類に大きく分類される．両者とも印加電界に反応して見かけの粘度が変化するという性質は同じであるが，粘度変化の発現のメカニズムが明確に異なることに基づいてその特性に違いがある.

2.2.1 粒子分散系 ERF

粒子分散系 ERF は，絶縁性の液体中に直径数μm～100μm の誘電性粒子を多数分散させた懸濁液である．シリコーンオイルにシリカ粒子を分散させた懸濁液は粒子分散系 ERF の一例である．固定電極間の粒子分散系 ERF に電界を印加することで媒質中の分散粒子の誘電分極により双極子が発生し，粒子相互に働く静電気力によって外部電界に沿って分散粒子が配列することによって図 2.1(a)に示すような鎖状構造が電極上に形成される．これにより，電極間の流れ

に対して流体抵抗が発生して見かけの粘度が変化する．電界印加時において固定電極間を粒子分散系 ERF が流れるためには，この鎖状構造の一部を破断する必要があり，図. 2.2(a)のような印加電界強度によって降伏応力が変化するビンガム流体の特性を示す．電界印加によって生じる降伏応力の存在によって，降伏応力以下の弁差圧においては完全に流動を停止させることができる．粒子分散系 ERF は，均一系 ERF と比較して安価であり，大きい粘度変化が得られるというメリットがある．その一方で，デメリットとして粒子の沈降や粒子自身および粒子による電極等の摩耗の可能性があること，また，粒子と液体の温度特性が異なることが多く温度の影響を受けやすいことが挙げられる．液圧マイクロアクチュエータシステムの動作流体として粒子分散系 ERF を用いる場合は，直径 1mm 以下が想定される微細な流路に最大 100μm 程度の分散粒子が流れることになり，分散粒子による流れの不安定挙動や流路の閉塞の恐れがある．そのため，本章で提案する新動作原理の液圧マイクロアクチュエータシステムの動作流体として粒子分散形 ERF は適さない．

2.2.2 均一系 ERF としてのネマティック液晶

均一系 ERF には液晶，エラストマー溶液，コロイド溶液等があるが，中でも液晶は粘度変化が大きく，比較的低い印加電界で応答性高く分子が配向することから多くの研究がなされている．ER 効果を発現する液晶は分子の配列によってスメクティック液晶とネマティック液晶とに分類される．液晶分子が一定方向に整然と並ぶ層状構造となっているスメクティック液晶は粘性の大きいグリース上の物質であり非常に低いせん断応力がはたらく領域でしか粘度変化が発現しない [14]．それに対し分子の長軸が一定方向に揃っているが層状構造はとらず長軸方向に自由に分子が動くことができるネマティック液晶は誘電異方性が大きく基底粘度が比較的低いため，微細な液圧配管部において動作流体として用いたときに粘度変化が大きく [15-17]かつパワー損失が小さく，液圧マイクロアクチュエータシステムの動作流体としての応用が期待できる．

ネマティック液晶は，長さ数 nm，幅サブ nm といった電気双極子モーメントを持つ細長い棒状の分子により構成され，分子の長手方向とそれに垂直な方向で誘電率が異なる誘電異方性を有する．図 2.1(b)に流動するネマティック液晶へ電界印加したときの液晶分子の応答の模式図を示す．電界が無い状態で流路を流れる液晶分子は，流れ場の存在に起因して棒状分子の長軸が流れ方向に対して平行となるように流動する．次に，液晶分子が流路に平行に配向して流動する

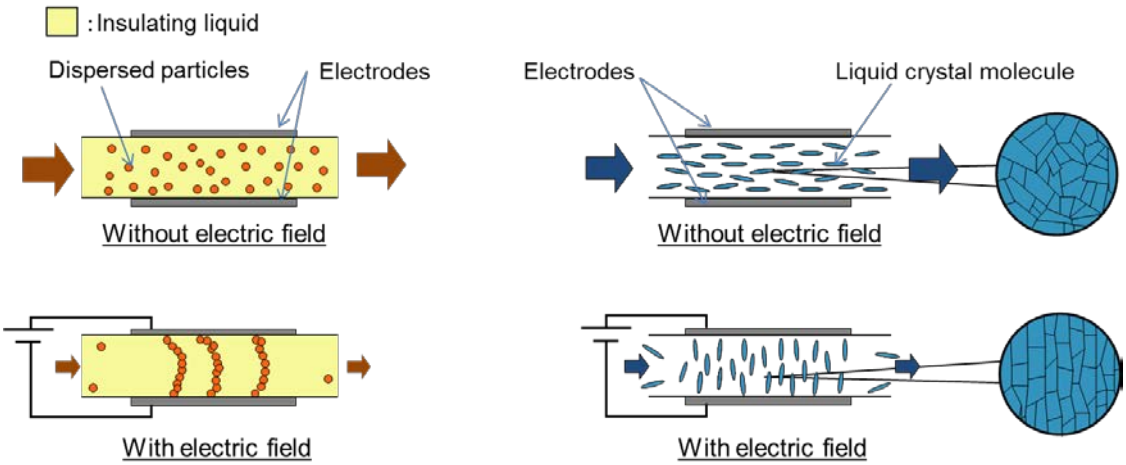
状態から流れに対して垂直な方向に電界を印加することにより，液晶分子に誘電分極が発生して電界と同じ方向へ分子が配向する．そのため，電極上の長い棒状の液晶分子全体が流れに対して平行から垂直へとその姿勢が変化されるため，見かけの粘度が増加するとされる．この粘性の変化に起因して，電界を与える固定電極間での圧力損失や流量が変化するため，流体制御機構として応用することが可能となる．

図 2.3 に示すような流動する液晶分子に電界を印加するモデルを考える．上述したように，ネマティック液晶の見かけの粘度変化はその長い棒状分子の流動中の姿勢，つまり液晶分子の傾きの変化に起因する．液晶分子の傾きはそれに働く 2 種類のトルクのつりあいにより決まるとされ，それは流れ場の存在に起因して分子を流路と平行に配向しようとするせん断応力によるトルクと，外部電界により分子を流路と垂直に配向しようとする誘電分極によるトルクである [18]．このモデルによって均一系 ERF の流動特性を説明することができる．図. 2.2(b)に示すように，せん断速度が小さい領域ではニュートン流体に近い特性を示し，せん断速度が大きくなると流動特性は非線形となる．これは，せん断速度の増加にともなって分子にはたらくせん断応力が増すと，せん断応力によるトルクが支配的になりこれが誘電分極によるトルクに対して十分に大きくなると，分子の垂直方向への配向が崩れるため，結果として流体の粘度変化を維持できなくなるためと考えられる．

均一系 ERF としてのネマティック液晶は粒子分散系 ERF（例えばシリコーンオイルにシリカ粒子を分散させたもの）に比べて高価で電界印加時に粘度変化が小さく，また降伏応力を有しないため流量を完全にストップすることができないというデメリットがある．しかし，比較的低い印加電界から ER 効果を発現でき，また分散粒子を含まず液晶それ自体の性質により見かけの粘度変化を発生させるため，分散粒子による流れの不安定挙動，流路の閉塞，電極等の摩耗といった問題が生じる可能性がない．したがって，幅数十μm 程度のマイクロ流路でも動作流体として用いることができる．さらに，マイクロ流路でも動作可能ということは電極間隔を小さくして低電圧動作を実現することも可能なため，省エネルギー効果や，使用可能な電圧の大きさに制限があるような応用先への適用が期待できる．

以上のことから，本研究では ER マイクロアクチュエータの動作流体として

均一系 ERF であるネマティック液晶を用いることとする．また，以降の文中で特に指定しない場合，ERF は均一系 ERF を意味するものとする．



(a) Particle type　　(b) Homogeneous type

Fig. 2.1 ER effect mechanisms

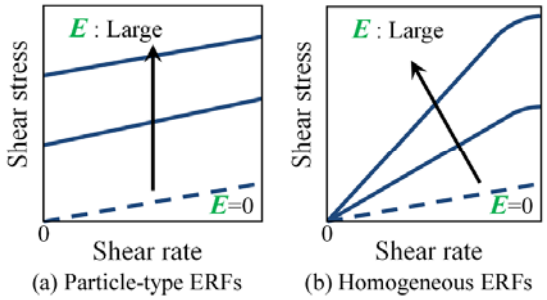


Fig. 2.2 Typical characteristics of two types of ERFs

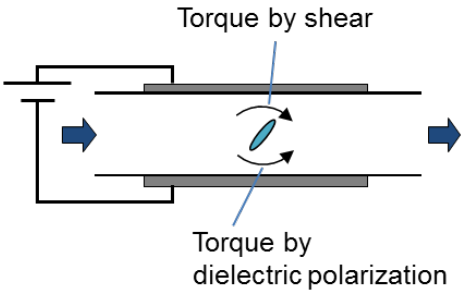


Fig. 2.3 Torques acting on a nematic liquid crystal molecule

2.3　ER マイクロバルブ

2.2 節で述べたように ERF の特長は印加電界によって見かけの粘度を変化させることができることであり，流路に電極を設けただけのシンプルな構造でマイクロ流体制御が可能となる．この ERF の特長をマイクロバルブに応用したものを ER マイクロバルブ [18-21]と呼ぶ．図 2.4 にその概略図を示す．ER マイクロバルブは，流路とその流路の一部に設けた電界印加のための固定電極から構成される．流路に設けられた電極間に流れる ERF は，前節で説明した流体自体の特性により，電界を印加することにより見かけの粘度を増加させることができる．そのため同一流量の条件においては，印加電界により流路に設けられた電極の上流下流間の差圧を制御することが可能である． 上流側と下流側の差圧である弁差圧ΔP と電極間の弁通過流量 Q の関係をあらわす弁制御静特性は，図 2.5 のようになる．図 2.5 は図 2.2(b)と対応するものである．

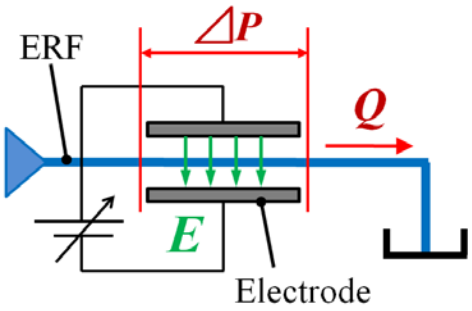


Fig. 2.4 Configuration of ER microvalve

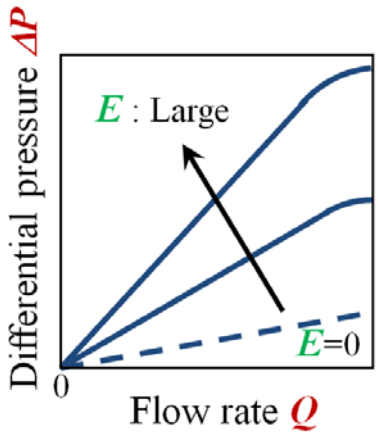


Fig. 2.5 Control of flow rate and differential pressure in ER microvalve

また，図 2.6 に示すように長方形断面流路をもつ 1 組の平行平板からなる電極対を構成した場合，電極間を流れる流量 Q に対して生じる差圧ΔP は，長方形断面の圧力損失式から式（2.1）のように表すことができる．

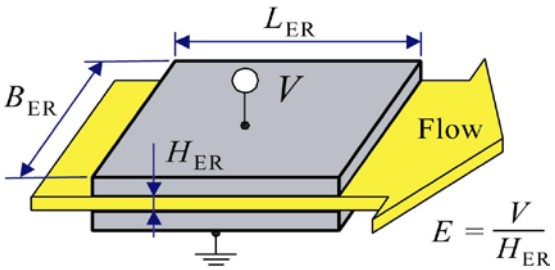


Fig. 2.6 Parameters of ER microvalve

$$\Delta P = \frac{64 L_{ER} \mu(E)}{B_{ER} H_{ER}^{\ 3} \lambda} Q = R_{ER}(E) Q \tag{2.1}$$

$$\lambda = \frac{16}{3} - \frac{1024}{\pi^5} \cdot \frac{H_{ER}}{B_{ER}} \left(\tanh \frac{\pi B_{ER}}{2H_{ER}} + \frac{1}{3^3} \tanh \frac{3\pi B_{ER}}{2H_{ER}} + \cdots\cdots \right) \tag{2.2}$$

ただし，B_{ER}：電極幅，L_{ER}：電極長さ，H_{ER}：電極間隔，$\mu(E)$：電界強度 E で定まる見かけの粘度，λ: 流路断面の縦横比で定まるパラメータである．この式によって，印加電界強度 E により粘度$\mu(E)$を制御することで，流路抵抗 $R_{ER}(E)$が変化し，流量 Q に対する差圧ΔP を制御することが可能であることがわかる．また，同一流量 Q において差圧ΔP が何倍に変化するかは，式（2.3）に表すような見かけの最大粘度μ_{max} と電界無印加時の基底粘度μ_{min} の比で決まり，このときのκ_{ER} を ER 効果の大きさと呼ぶことにする．

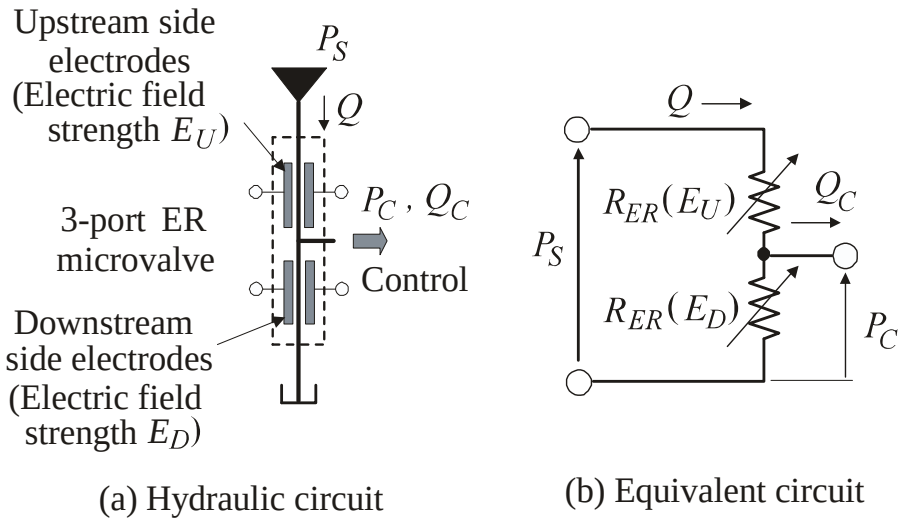
$$\kappa_{ER} = \frac{\mu_{max}}{\mu_{min}} \tag{2.3}$$

ER マイクロバルブにおいて，ERF が流入する上流側を供給ポート，流出する下流側を排出ポートと呼ぶ．流路に 1 組の電極対を設けただけの ER マイクロバルブは，供給と排出の 2 個のポートのみを有するため 2 ポート ER マイクロ

バルブと呼ぶ．この 2 ポート ER マイクロバルブを直列に 2 個接続して，その間に 3 個目のポートとして制御ポートを設けたものを 3 ポート ER マイクロバルブと呼ぶ．図 2.7 に 3 ポート ER マイクロバルブの液圧回路および等価回路を示す．制御流量 Q_C が 0 である場合の制御圧力 P_C は式（2.4）のように表される．

$$P_c = \frac{R_{ER}(E_D)}{R_{ER}(E_U) + R_{ER}(E_D)} P_S \tag{2.4}$$

ただし, E_U : 上流側電極印加電界強度, E_D : 下流側電極印加電界強度, $R_{ER}(E_U)$: 印加電界強度 E_U に依存する上流側の電極部の流路抵抗, $R_{ER}(E_D)$: 印加電界強度 E_D に依存する下流側の電極部の流路抵抗である．



(a) Hydraulic circuit　　(b) Equivalent circuit

Fig. 2.7 Configuration of 3-port ER microvalve

流路抵抗の変化は ER 効果によるものなので，最大で κ_{ER} 倍だけ変化する．たとえば，κ_{ER}=4 とすると，式（2.4）より制御圧力 P_C は供給圧力 P_S の 20～80%の範囲で制御できると見積もられる. ER 効果の大きさ κ_{ER} を横軸に，制御できる制御圧力の変化 ΔP_C の供給圧力に対する割合 $\Delta P_C/P_S$ を縦軸にとると図. 2.8 のようになる．κ_{ER} が 4 以上になると，$\Delta P_C/P_S$ の増加率は低くなる．したがって，均一系 ERF の選定においては κ_{ER} が 4 以上であれば，基底粘度，動特性および価格といった項目を重視した方がよいと考えられる．

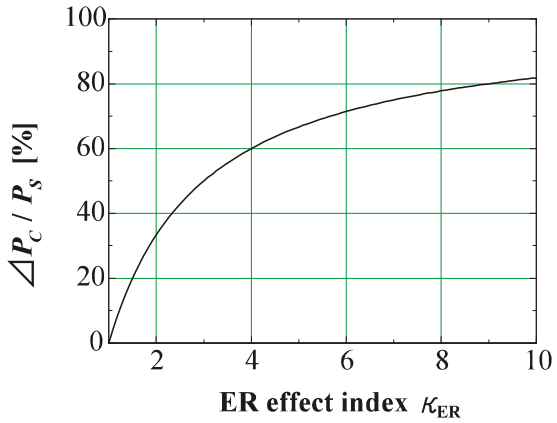


Fig. 2.8 Control pressure range for ER effect index

これまでに行われてきた研究によって，均一系 ERF を動作流体として様々な流路寸法を有する ER マイクロバルブがいくつかの製作手法によって開発されてきた．まず，吉田らにより均一系 ERF を動作流体とした ER バルブが提案され，機械加工による金属製の ER バルブが試作されている [19]．このバルブは，直径 4.5mm，流路高さ H_{ER}=150μm，電極幅 B_{ER}=1.2mm，電極長さ L_{ER}=8.9mm のワイヤ放電加工により製作された 3 ポート ER バルブで，動作流体として大日本化学インキ工業(株)製のネマティック液晶を用いたとき，0.34MPa の供給圧力を 0.13MPa 変化できることが確認されている．加工精度の向上とさらなるマイクロ化を目指すため，MEMS 技術を応用した ER マイクロバルブが提案，試作されている [20]．菊池らにより試作された流路高さ 150μm のシリコン製 ER マイクロバルブの概要図と断面図を図. 2.9，図. 2.10 に示す．異方性シリコンエッチング技術により流路高さ H_{ER} が最大 150μm から最小 80μm のマイクロバルブが試作され，流路高さ 80μm の特性実験において，動作流体に大日本化学インキ工業(株)製の低分子液晶 RDP-40628 を用いたとき，0.23MPa の供給圧力を 0.15MPa 変化できうることが確認された．このとき，制御ポートの圧力制御に関して機械加工によるものより優れた特性の実験結果が得られている．さらにマイクロシステムへの ERF の応用のために，ネマティック液晶の ERF としての挙動を説明するための物理モデルが構築され，シリコン製 ER マイクロバルブによる実験結果と物理モデルによるシミュレーションとの比較によりその妥当性が確認されている [18]．

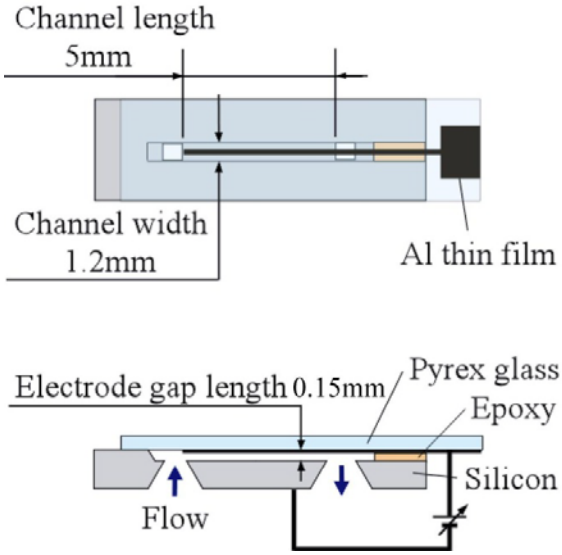


Fig. 2.9 Schematics of 2-port ER microvalve

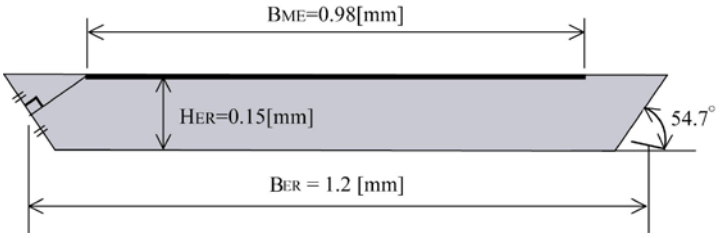


Fig. 2.10 Cross-section of ER microvalve flow channel

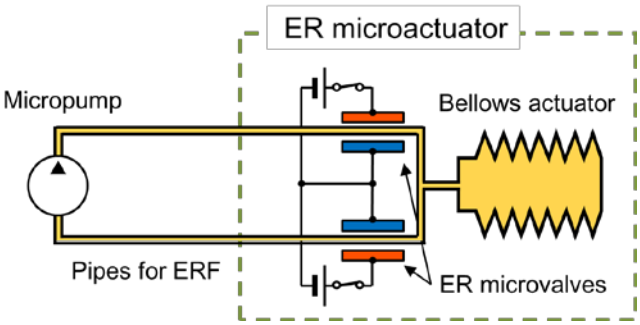
2.4　交流圧力源を用いた ER マイクロアクチュエータシステムの提案

2.4.1　従来の ER マイクロアクチュエータシステム

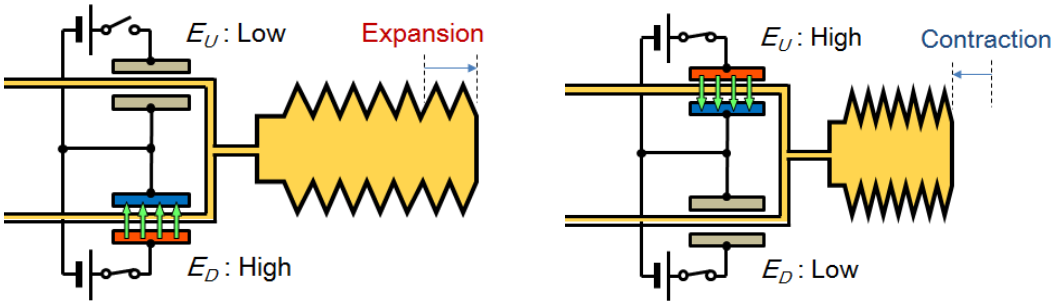
ERF を動作流体とした新しい動作原理の液圧マイクロアクチュエータシステムの提案に先立ち，従来の ER マイクロアクチュエータシステムの動作原理を説明する．従来の ER マイクロアクチュエータシステムは，3 ポート ER マイクロバルブの制御ポートにベローズやダイアフラムなどの液圧アクチュエータを取り付けることによって構成される ER アクチュエータと，ERF を循環させるマイクロポンプから成る．本研究室では様々な可動要素を用いたアクチュエータが研究されている．たとえば矢野らにより圧力を薄膜により変位，もしくは力に変換するダイアフラム形マイクロアクチュエータの研究が行われている [22]．また，制御ポートにベローズなどの可動チューブを設けたベローズ形アクチュエータの研究も進められている [21]．さらに，ストロークが大きい転動形ダイアフ

ラムを用いたマイクロローリングダイアフラムアクチュエータ(Micro Rolling Diaphragm Actuator: MRDA)に ER マイクロバルブを一体化したアクチュエータの研究も行われている [23, 24].

ここではベローズを例として取り上げ, 3 ポート ER マイクロバルブを用いた ER マイクロアクチュエータの動作原理について述べる．ベローズ形アクチュエータを駆動する場合のアクチュエータシステムを図 2.11 に示す．ベローズを伸長させる際は，上流側の流路抵抗を減少させ，下流側の流路抵抗を増加させる．つまり，上流側の ER バルブの電極の電圧を下げ，下流側の電圧を上げる．これにより制御ポートの圧力が上がりベローズに ERF が流れ込み，ベローズは伸長する．逆に，ベローズを収縮させる場合は，上流側の流路抵抗を増加させ，下流側の流路抵抗を減少させる．つまり，上流側の電圧を上げ，下流側の電圧を下げる．これにより制御ポートの圧力が下がり，ベローズの弾性によりその内部の流体が制御ポートに流れ込むため，ベローズは収縮する．



(a) Schematic of ER microactuator system



(b) Expansion　　(c) Contraction

Fig. 2.11 Working principle of ER microactuator system using 3-port ER microvalve

本研究室ではこれまで，図 2.12 に示すような ER マイクロアクチュエータシステムを応用しマイクロロボットを試作している．従来のシステムでは動作流体 ERF をマイクロポンプで循環させ流量, 圧力を各アクチュエータに供給する．そのとき，液圧アクチュエータ 1 個ごとに動作流体の供給と戻り用の液圧配管が 2 本ずつ必要となる．また，多自由度な動作を有するマイクロシステムでは複数のマイクロアクチュエータを搭載する必要があるが，アクチュエータの個数が増えると液圧配管部が大きなスペースを占有する．さらに，ERF として用いるネマティック液晶の基底粘度は一般に水と比べて 10 倍程度以上大きいため，とくにマイクロ化のため液圧配管のスペースを小さく維持した場合，ERF を循環させる際に配管におけるパワー損失が大きくなる．このように，従来の ER マイクロアクチュエータシステムには多自由度化と ERF 使用によるマイクロ化とパワー損失の問題が存在する．

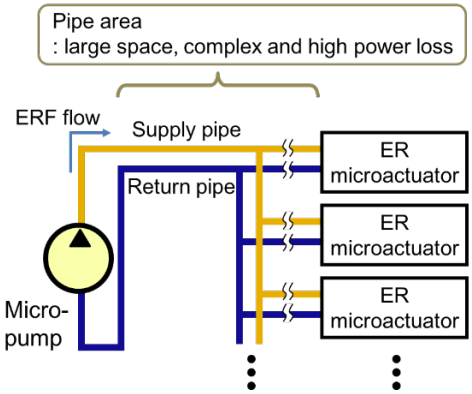


Fig. 2.12 Conventional multi-DOF ER microactuator system

2.4.2　交流圧力駆動 ER マイクロアクチュエータシステムの提案

2.4.1 項で述べた従来のシステムの問題を克服するために，本研究では新動作原理の ERF を動作流体とした液圧マイクロアクチュエータシステムとして図 2.13 に示す交流圧力駆動多自由度 ER マイクロアクチュエータシステムを提案する．

これまでに，交番的に変動させた圧力または流量を用いて動力や信号を伝達する方式として管内交液流(alternating flow hydraulics)[25]が研究されており，その伝達特性の解析および実験的確認が行われているが，提案するシステムの動作原理は交流圧力により交番的に流動する ERF を ER マイクロバルブによって整

流することに基づく．従来の液圧アクチュエータシステムでは一定方向に直流的に動作流体を循環させていたのに対して，提案するシステムでは交流圧力によって交番的に流動する動作流体によってシステム各部に圧力と流量を供給するため，本論文内では交流圧力によって動作する液圧システムを交流圧力システムと表記する. 提案する交流圧力駆動多自由度 ER マイクロアクチュエータシステムを図 2.13(a)に示す．交番圧力を発生する交流圧力源と ER マイクロアクチュエータで構成され，さらに ER マイクロアクチュエータは 2 個の ER マイクロバルブと液圧アクチュエータで構成される．ここで交流圧力源とは，通常のポンプが一方向流を発生させるのとは異なり，一つの吐出口から流体の吐出・吸入を繰り返し，交流圧力を発生させるシンプルな構造のポンプを指す. 動作原理を図 2.14 に示す.

提案するアクチュエータシステムの基本的な動作原理は，交流圧力源によって生じる動作流体 ERF の交番流れを末端のマイクロアクチュエータ内で ER マイクロバルブによって整流することで局所的に一方向流れを形成し，それを利用してアクチュエータを駆動することである．以下に動作原理の詳細な説明を示す.

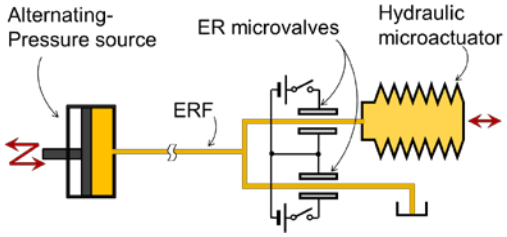
(a) 交流圧力源から ERF が流出するタイミングに ER マイクロバルブ A の電界をオフ，ER マイクロバルブ B の電界をオンとするタイミングを同期させる(図 2.14(a)). これによりバルブ B では ERF が ER 効果によりほぼ遮断され，交流圧力源からの ERF の大部分がバルブ A のほうに流入し液圧アクチュエータが伸長する.

(b) 交流圧力源に ERF が流入するタイミングにバルブ A の電界をオン，バルブ B の電界をオフとするタイミングを同期させる(図 2.14(b)). バルブ A では ERF がほぼ遮断されるため交流圧力源に戻される ERF の大部分はバルブ B からになり，ここでは液圧アクチュエータは収縮しない.

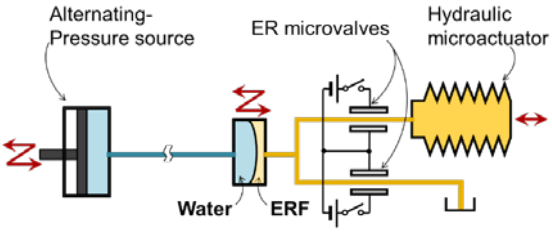
これら(a)，(b)を繰り返すことでアクチュエータを累積的に伸長させることが可能となる．また，バルブ A とバルブ B へ電界印加するタイミングを入れ換えるとアクチュエータを累積的に収縮することができる．アクチュエータを停止させることは，バルブ A およびバルブ B に同じ大きさの電界を定常的に印加することによって可能となる.

上述の動作原理にように，交流圧力源による ERF の吐出・吸入と 2 個の ER

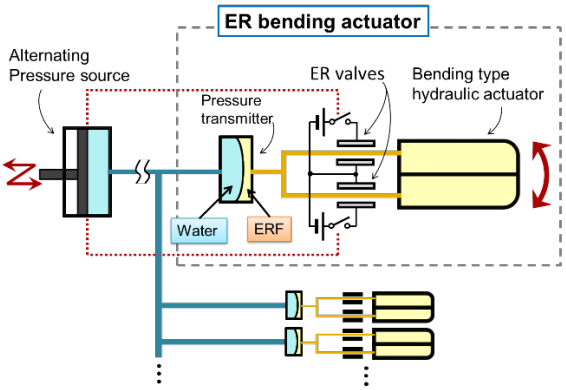
マイクロバルブへの電界印加のタイミングを同期させることで，1 本の液圧配管で液圧アクチュエータを動作させることが可能となり，液圧配管系がシンプルなシステムが構築される．これは，交流圧力源からの動作流体の供給と戻りの両方が 1 本の液圧配管によってなされるためであり，従来の直流形の液圧アクチュエータシステムと比較すると液圧配管部の占有スペースが，単純に考えて半分となる．また，アクチュエータを複数個並列に動作させる場合，ER マイクロバルブへの電界印加のタイミングを各アクチュエータで制御することで，複数のアクチュエータを独立して駆動させることができる．つまり，ER マイクロバルブと交流圧力源を用いて交流圧力システムを構築することで各アクチュエータに対する液圧配管 1 本で多自由度アクチュエータシステムが構築可能となる．



(a) Alternating-pressure system

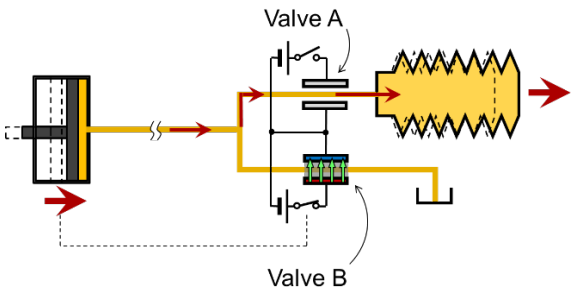


(b) ERF/water hybrid system

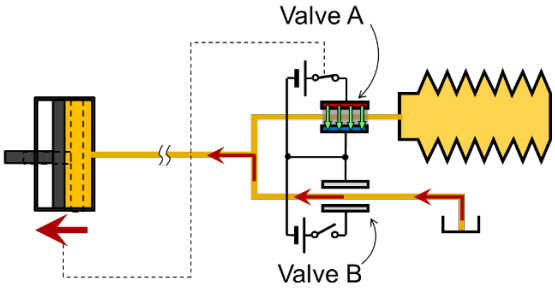


(c) Multi-DOF ER bending actuator system

Fig. 2.13 Proposed ER microactuator systems driven by alternating pressure



(a) Outflow period



(b) Inflow period

Fig. 2.14 Working principle of new ER microactuator system

さらに，図 2.13(b)のように交番流れのために容易に使用することができる圧力伝達部を設けると，システム中の任意の場所で任意の動作流体を使用することが可能となり，交流圧力源からアクチュエータに至るまでの ERF を低粘度の流体，たとえば水に置換することが可能となる．これにより，同一の長さおよび流路抵抗に対し，流路の直径と占有する断面積を小さくすることができる．差圧 ΔP が与えられたときの円形断面を有する配管における流量 Q は，

$$Q = \frac{\pi D_{pi}^{\ 4}}{128 \mu L_p} \Delta P \tag{2.5}$$

また，

$$S_p = \frac{\pi D_{po}^{\ 2}}{4}, \quad \therefore D_{pi}^{\ 2} = \left(\frac{D_{pi}}{D_{po}}\right)^2 D_{po}^{\ 2} = \left(\frac{D_{pi}}{D_{po}}\right)^2 \frac{4S_p}{\pi} \tag{2.6}$$

となり，その流路抵抗 R_p は以下の式で与えられる

$$R_p = \frac{\Delta P}{Q} = \frac{128 \mu L_p}{\pi D_{pi}^{\ 4}} = 8\pi L_p \left(\frac{D_{po}}{D_{pi}}\right)^4 \frac{\mu}{S_p^{\ 2}} = 8\pi L_p \left(1 + \frac{p_{\max}}{\sigma_a}\right)^4 \frac{\mu}{S_p^{\ 2}}, \tag{2.7}$$

ここで, 流路の断面積を S_p，外径を D_{po}, 内径を D_{pi}，長さを L_p, 最大圧力を $p_{\max}$, 流路の材料の許容応力を σ_a, 作動流体の粘度を μ とする．したがって，同一の長さ L_p および流路抵抗 R_p となる管路の断面積を図 2.12 の従来のシステムに対し S_a, 図 2.13 の提案するシステムに対し S_c とし，水の粘度を μ_w, ERF の基底粘度を μ_{ER} とすると，交流圧力システムのため流路数が 1/2 となることも考慮して,

$$\frac{S_c}{2S_a} = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\mu_w}{\mu_{\mathrm{ER}}}}, \tag{2.8}$$

が成立する．例えば $\mu_{\mathrm{ER}}/\mu_w = 20$ のとき，同一断面積に対し約 9 倍の個数のアクチュエータを駆動可能となる．

提案する交流圧力駆動 ER マイクロアクチュエータシステムのもう一つの利点は，システムの重要な要素である駆動源と流体制御部品などがシンプルな構造であり，MEMS 微細加工の適用が容易な点である．駆動源である交流圧力源は動作流体の吐出と吸入を繰り返すだけの機能を持てばよいので，圧電アクチュエータや電気活性ポリマーアクチュエータによって駆動されるダイアフラムなどの簡単な振動子が候補として考えられる．また上述したように流体制御部品としての ER マイクロバルブは流路に電極を設けただけのシンプルな構造である．さらに，圧力伝達部は柔軟なダイアフラムで容易に製作できる．

交流圧力システムのもう一つの特長として，圧力伝達部の入力側と出力側の断面積を異なるようにすることで，圧力と流量を容易に変換することが可能となることが挙げられる．例えば，図 2.15 に示すような圧力-流量変換機構で液圧配管部において高い供給圧力と低流量を実現することでパワー損失をさらに低減することができる．なぜなら，低流量のために粘性圧力損失が低下し，また，高圧力のために粘性圧力損失が相対的に低下するからである．この変換機構は

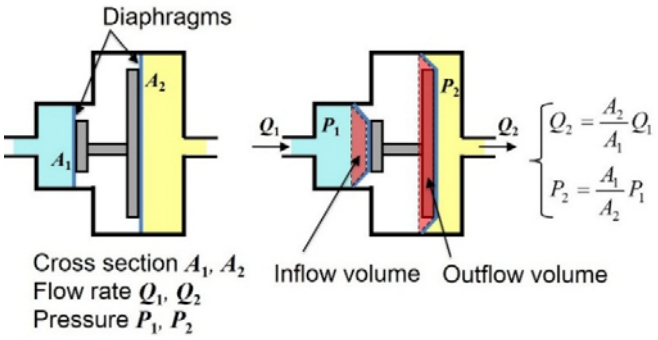


Fig. 2.15 Schematics of a transformer

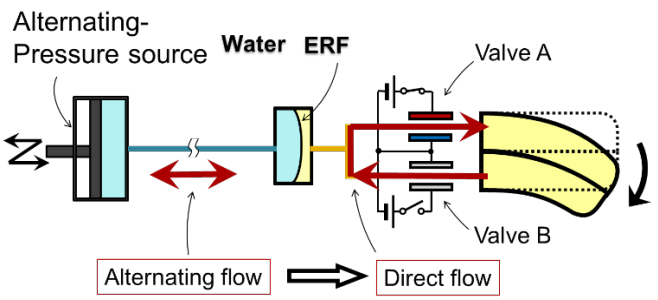


Fig. 2.16 Proposed ER bending actuator system

従来の直流形の液圧マイクロシステムでは液圧モータと液圧ポンプを接続した HST（Hydrostatic Transmission）などの複雑な機構を用いないと実現できないものであり，交流圧力システム特有の機構の一つだと言える．

図 2.13(b)のシステムには各アクチュエータに付随してタンクが必要となり，これは駆動力には貢献していない．そこで本研究では，図 2.13(c)に示す交流圧力駆動多自由度 ER 屈曲アクチュエータシステムを提案する．図 2.13(b)の液圧アクチュエータとタンクの代替として，提案する屈曲形の液圧マイクロアクチュエータ（以降，屈曲アクチュエータと呼ぶ）は 2 個の柔軟な液圧室を有し，それらの液圧室間の差圧によって屈曲動作を実現する． 動作原理としては図 2.14 のものと同様であり，交流圧力源から水が流出するタイミングにバルブ A の電界をオフ，バルブ B への電界をオンとするタイミングを同期させると上側の液圧室は ERF が流入し伸長し，屈曲アクチュエータは下方に屈曲する．次に交流圧力源に水が流入するタイミングにバルブ A の電界をオン，バルブ B の電界をオフとするタイミングを合わせると，下側の液圧室から ERF が流出し収縮し，やはり屈曲アクチュエータは下方に屈曲する．また，屈曲アクチュエータの停止についても図 2.14 のシステムと同様にしてバルブ A およびバルブ B に同じ大きさの電界を定常的に印加することで可能である．これらの協調動作により図 2.16 に示すように屈曲アクチュエータの一方の液圧室から他方の液圧室に ERF が移動することで屈曲変位を得るものである．具体的な屈曲アクチュエータの詳細な説明は 3 章以降で行う．

2.5　交流圧力源を用いた ER 屈曲アクチュエータシステムの理論解析

まず，簡単なモデルを用いて，交流圧力源を用いた ER マイクロアクチュエータシステムの基本特性の解析を行う．解析に使用するモデルを図 2.17 に示す．この解析では外力 F_L は一定，慣性力および摩擦力は無視し，アクチュエータはピストン・シリンダ系として伸長動作時を考える．ただし，$p_S(t)$：交流圧力源から供給される圧力，$q(t)$：流量，P_L：シリンダ内圧力，$r_{\mathrm{ER}}(t)$：ER マイクロバルブにおける流路抵抗，A：シリンダ断面積，$x(t)$：変位，E：電界強度であり，$p_S(t)$は振幅を P_0，周期を T として

$$p_S(t) = P_0 \sin \frac{2\pi}{T} t \tag{2.9}$$

として与える．ER マイクロバルブに電界 E を印加することによって $r_{\mathrm{ER}}(t)$は

$$r_{ER}(t) = \begin{cases} R & (nT \le t \le (n+\frac{1}{2})T) \\ \kappa_{ER} R & ((n+\frac{1}{2})T \le t \le (n+1)T) \end{cases}, \tag{2.10}$$

のように変化するとする．F_L 一定で，慣性力は無視するので

$$P_L = \frac{F_L}{A} = const. \tag{2.11}$$

$$p_S(t) - P_L = r_{ER}(t) q(t) = r_{ER}(t) A \frac{dx(t)}{dt} \tag{2.12}$$

が得られ，これより

$$\frac{dx(t)}{dt} = \frac{p_S(t) - P_L}{r_{ER}(t) A} \tag{2.13}$$

となるため，$x(t)$について整理すると

$$x(t) = \begin{cases} x(nT) - \dfrac{P_0 T}{2\pi AR}\left(\cos\dfrac{2\pi}{T}t - 1\right) - \dfrac{F_L}{A^2 R}(t - nT) \\ \qquad\qquad (nT \le t \le (n+\frac{1}{2})T) \\ x((n+\frac{1}{2})T) - \dfrac{P_0 T}{2\pi \kappa_{ER} AR}\left(\cos\dfrac{2\pi}{T}t + 1\right) \\ - \dfrac{F_L}{\kappa_{ER} A^2 R}(t - (n+\frac{1}{2})T) \\ \qquad\qquad ((n+\frac{1}{2})T \le t \le (n+1)T) \end{cases}, \tag{2.14}$$

が得られ，平均速度は

$$v_a = \frac{x((n+1)T) - x(nT)}{T} = \frac{(\kappa_{ER} - 1)P_0}{\pi \kappa_{ER} AR} - \frac{\kappa_{ER} + 1}{2\kappa_{ER} A^2 R} F_L, \tag{2.15}$$

となる．無負荷変位と負荷特性を図 2.18 に示す．負荷力に応じて平均速度が得られており，提案する交流圧力駆動 ER マイクロアクチュエータシステムが動作可能であることを確認することができた．

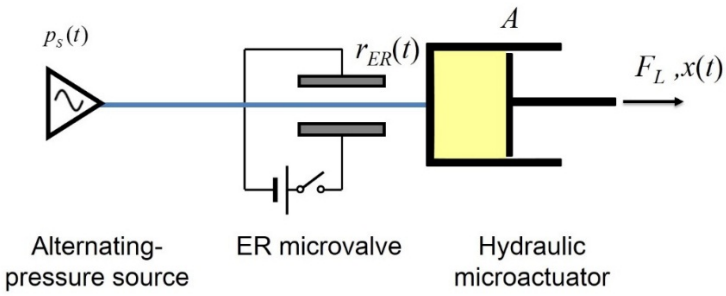
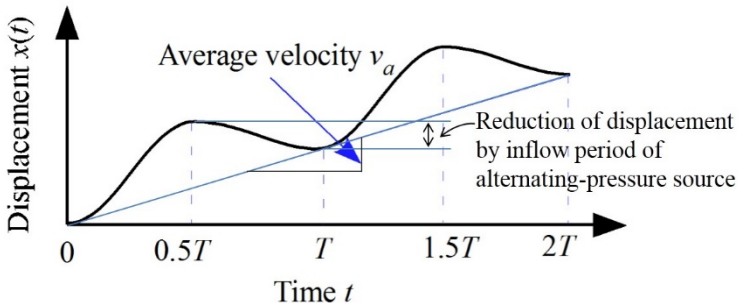
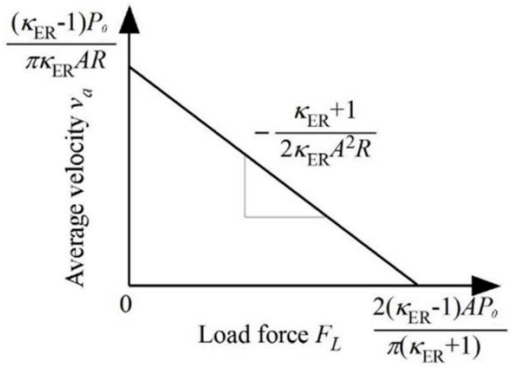


Fig. 2.17 Analytical model of ER micro actuator system using alternating pressure source



(a) Time history of displacement $x(t)$ under no-load and



(b) Load characteristics.

Fig. 2.18 Analysis results of the ER microactuator system using an alternating pressuresource

次に，現実的な図 2.13(c)の交流圧力源を用いた ER 屈曲アクチュエータシステムの特性の理論解析を行う．解析するモデルを図 2.19 に示す．ER 屈曲アクチュエータはフレキシブルな液圧アクチュエータ部の屈曲動作によって先端変位を得るが，ここでは直動シリンダとばねを組み合わせたモデルで近似しており，圧力伝達部における作動流体間の圧力伝達が理想的に行われるものとして圧力伝達部を省略している．屈曲アクチュエータ部の各液圧室が独立した状態で伸縮するときの弾性を K_a，各液圧室の動作が干渉することによって生じる弾性を K_b で表している．ただし，

$$p_s(t) = P_0 \sin \omega t = P_0 \sin \frac{2\pi}{T} t \tag{2.16}$$

$$r_{ER1} = \begin{cases} \kappa_{ER} R & (nT \le t < (n+1/2)T) \\ R & ((n+1/2)T \le t < (n+1)T) \end{cases} \tag{2.17}$$

$$r_{ER2} = \begin{cases} R & (nT \le t < (n+1/2)T) \\ \kappa_{ER} R & ((n+1/2)T \le t < (n+1)T) \end{cases} \tag{2.18}$$

であり，交流圧力源からの供給圧力を $p_s(t)$，流量を $q\ (t)$，各シリンダ内圧力を $p_1(t)$，$p_2\ (t)$，各 ER マイクロバルブにおける流路抵抗を r_{ER1} , r_{ER2}，各シリンダ断面積を A，各シリンダの変位を $x_1\ (t), x_2\ (t)$，圧力振幅を P_0，角周波数を ω とする．このとき，以下の式が成立する．

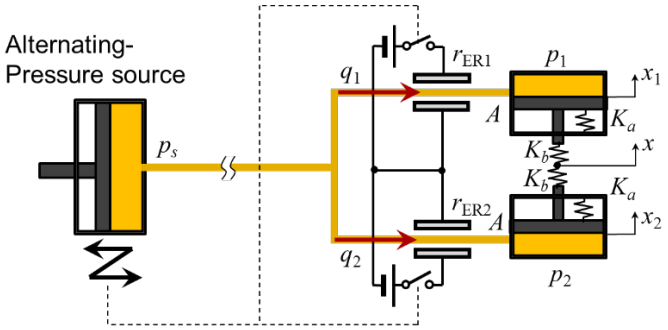


Fig. 2.19 analytical model of ER micro actuator system using alternating-pressure source

$$p_S = r_{ER1} q_1 + p_1 = r_{ER2} q_2 + p_2 \tag{2.19}$$

$$A p_1 + K_a x_1 = A p_2 - K_a x_2 = K_b \frac{x_2 - x_1}{2} \tag{2.20}$$

$$x_1 - x = x - x_2 \quad \therefore x = \frac{x_1 + x_2}{2} \tag{2.21}$$

$$q_1 = -A\frac{dx_1}{dt} \tag{2.22}$$

$$q_2 = A\frac{dx_2}{dt} \tag{2.23}$$

これらの式を連立し，ラプラス変換して解くと，

$$\begin{bmatrix} X_1(s) \\ X_2(s) \end{bmatrix} = \frac{1}{s^2 + \dfrac{(2K_a + K_b)(\kappa_{ER}+1)}{2A^2\kappa_{ER}R}s + \dfrac{K_a(K_a+K_b)}{A^4\kappa_{ER}R^2}} \times \begin{bmatrix} -\dfrac{p_0\omega}{Ar_{ER1}}\dfrac{s}{s^2+\omega^2} - \dfrac{K_aP_0}{A^3\kappa_{ER}R^2}\dfrac{\omega}{s^2+\omega^2} + x_1(0)s + \left(\dfrac{2K_a+K_b}{2A^2r_{ER2}}x_1(0) + \dfrac{K_b}{2A^2r_{ER1}}x_2(0)\right) \\ \dfrac{p_0\omega}{Ar_{ER2}}\dfrac{s}{s^2+\omega^2} + \dfrac{K_aP_0}{A^3\kappa_{ER}R^2}\dfrac{\omega}{s^2+\omega^2} + x_2(0)s + \left(\dfrac{K_b}{2A^2r_{ER2}}x_1(0) + \dfrac{2K_a+K_b}{2A^2r_{ER1}}x_2(0)\right) \end{bmatrix} \tag{2.24}$$

が得られる．ただし，$r_{ER1}(t)$および $r_{ER2}(t)$が各時間区間内では定数であることを利用し，各区間の最初の時間を $t = 0$ とし，供給圧力の圧力振幅 P_0 は式(2.18)のように変化するものとする．

$$p_0 = \begin{cases} P_0 & (nT \le t < (n+1/2)T) \\ -P_0 & ((n+1/2)T \le t < (n+1)T) \end{cases} \tag{2.25}$$

このとき，特性方程式

$$s^2 + \frac{(2K_a + K_b)(\kappa_{ER}+1)}{2A^2\kappa_{ER}R}s + \frac{K_a(K_a+K_b)}{A^4\kappa_{ER}R^2} = 0 \tag{2.26}$$

の判別式は $D > 0$ であり，2 次方程式の解と係数の関係からその 2 個の根はともに負である．そこで，

$$s^2 + \frac{(2K_a + K_b)(1+\kappa_{ER})}{2A^2\kappa_{ER}R}s + \frac{K_a(K_a+K_b)}{A^4\kappa_{ER}R^2} = (s+\alpha_1)(s+\alpha_2) \quad (\alpha_1, \alpha_2 > 0) \tag{2.27}$$

とし，ラプラス逆変換すると，式(2.26)および式(2.27)が得られる．ただし，先にも述べたように，時間 t は各区間の最初を 0 としたものである．r_{ER1}，r_{ER2} および p_0 は式(2.17)，式(2.25)のように時間区間とともに変化する．

$$
\begin{aligned}
x_1(t) = {} & \frac{1}{\alpha_1-\alpha_2}\left[\begin{array}{l}\dfrac{p_0\omega}{A(\alpha_1{}^2+\omega^2)}\left(\dfrac{K_a}{A^2\kappa_{ER}R^2}-\dfrac{\alpha_1}{r_{ER1}}\right)\\ +\left\{\left(\alpha_1-\dfrac{2K_a+K_b}{2A^2r_{ER2}}\right)x_1(0)-\dfrac{K_b}{2A^2r_{ER1}}x_2(0)\right\}\end{array}\right]e^{-\alpha_1 t}\\
& +\frac{1}{\alpha_1-\alpha_2}\left[\begin{array}{l}-\dfrac{p_0\omega}{A(\alpha_2{}^2+\omega^2)}\left(\dfrac{K_a}{A^2\kappa_{ER}R^2}-\dfrac{\alpha_2}{r_{ER1}}\right)\\ +\left\{-\left(\alpha_2-\dfrac{2K_a+K_b}{2A^2r_{ER2}}\right)x_1(0)+\dfrac{K_b}{2A^2r_{ER1}}x_2(0)\right\}\end{array}\right]e^{-\alpha_2 t}\\
& +\frac{p_0\omega}{A(\alpha_1{}^2+\omega^2)(\alpha_2{}^2+\omega^2)}\left\{\frac{K_a(\alpha_1+\alpha_2)}{A^2\kappa_{ER}R^2}-\frac{\alpha_1\alpha_2-\omega^2}{r_{ER1}}\right\}\cos\omega t\\
& -\frac{p_0\omega}{A(\alpha_1{}^2+\omega^2)(\alpha_2{}^2+\omega^2)}\left\{\frac{K_a(\alpha_1\alpha_2-\omega^2)}{A^2\kappa_{ER}R^2\omega}+\frac{(\alpha_1+\alpha_2)\omega}{r_{ER1}}\right\}\sin\omega t
\end{aligned}
\tag{2.28}
$$

$$
\begin{aligned}
x_2(t) = {} & \frac{1}{\alpha_1-\alpha_2}\left[\begin{array}{l}-\dfrac{p_0\omega}{A(\alpha_1{}^2+\omega^2)}\left(\dfrac{K_a}{A^2\kappa_{ER}R^2}-\dfrac{\alpha_1}{r_{ER2}}\right)\\ +\left\{-\dfrac{K_b}{2A^2r_{ER2}}x_1(0)+\left(\alpha_1-\dfrac{2K_a+K_b}{2A^2r_{ER1}}\right)x_2(0)\right\}\end{array}\right]e^{-\alpha_1 t}\\
& +\frac{1}{\alpha_1-\alpha_2}\left[\begin{array}{l}\dfrac{p_0\omega}{A(\alpha_2{}^2+\omega^2)}\left(\dfrac{K_a}{A^2\kappa_{ER}R^2}-\dfrac{\alpha_2}{r_{ER2}}\right)\\ +\left\{\dfrac{K_b}{2A^2r_{ER2}}x_1(0)-\left(\alpha_2-\dfrac{2K_a+K_b}{2A^2r_{ER1}}\right)x_2(0)\right\}\end{array}\right]e^{-\alpha_2 t}\\
& -\frac{p_0\omega}{A(\alpha_1{}^2+\omega^2)(\alpha_2{}^2+\omega^2)}\left\{\frac{K_a(\alpha_1+\alpha_2)}{A^2\kappa_{ER}R^2}-\frac{\alpha_1\alpha_2-\omega^2}{r_{ER2}}\right\}\cos\omega t\\
& +\frac{p_0\omega}{A(\alpha_1{}^2+\omega^2)(\alpha_2{}^2+\omega^2)}\left\{\frac{K_a(\alpha_1\alpha_2-\omega^2)}{A^2\kappa_{ER}R^2\omega}+\frac{(\alpha_1+\alpha_2)\omega}{r_{ER2}}\right\}\sin\omega t
\end{aligned}
\tag{2.29}
$$

以上の結果よりアクチュエータの出力変位 $x(t)$の時間変化を求めることができる．式(2.28)，(2.29)中の各パラメータを P_0= 0.16 MPa, A= 1 cm^2, $K_a = K_b$ = 0.01 N/m, T = 0.1 s, κ_{ER}= 6 と仮定したときの ER 屈曲アクチュエータシステムの各変位 $x_1(t)$, $x_2(t)$, $x(t)$を Fig. 2.20 にまとめて示す．シンプルな数学モデルを用いた解析結果の図 2.18(a)と同様に，ER 屈曲アクチュエータで変位が得られることを確認することができた.

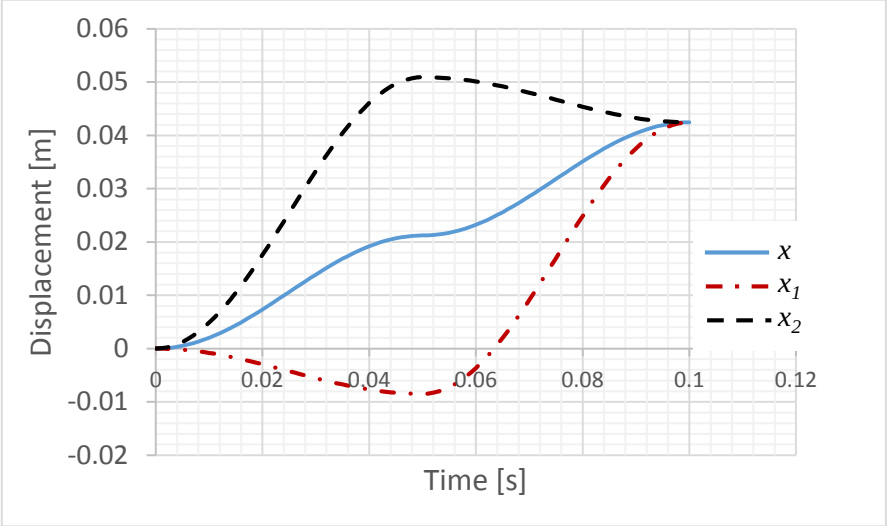


Fig. 2.20 Analysis results of the ER bending actuator system using an alternating pressure source

2.6　結言

本章では，機能性流体 ERF を用いた新動作原理の液圧マイクロアクチュエータシステムの提案を行った．

液圧制御バルブのマイクロ化のために，機能性流体 ERF の一種であるネマティック液晶を導入した．ERF であるネマティック液晶を動作流体として用いることで，流路に電極を設けただけのシンプルな構造によって流体制御が可能となり，分散粒子を含まないため流路の閉塞，電極等の摩耗といった問題が発生しないことにより液圧制御バルブのマイクロ化が実現可能であることを示した．

また，ネマティック液晶を動作流体とした制御バルブである ER マイクロバルブについて，その基本的な特性について数式を交えて示し，従来の開発状況を説明した．

そして，従来の ER マイクロアクチュエータシステムについて説明しその課題点を明らかにした後に，提案する交流圧力駆動 ER マイクロアクチュエータシステムの動作原理と利点を述べた．提案するシステムは交流圧力システムを適用し機能性流体 ERF を作動流体として用いることで，パワー損失を低減させ，マイクロサイズで構築可能であることを示し，またそのシンプルな構造の構成要素は MEMS 微細加工技術の適用がしやすく，交流圧力システム独自の圧力流量の変換の容易さについても述べた．さらに，そのタンクをフレキシブルフィンガの液圧室に交換し，効率的に屈曲動作が得られる交流圧力駆動 ER 屈曲アクチュエータシステムを提案した．

最後に，簡易モデルを用いた理論解析を行い，基本的な特性と本システムの妥当性を確認するとともに，詳細モデルを構築しその解析を行った．

第 3 章　ラージモデルによる動作原理検証 (13)

3.1　緒言

第 2 章では交流圧力システムを適用し機能性流体 ERF を作動流体として用いることで，パワー損失を低減させマイクロサイズで構築可能な新動作原理の液圧アクチュエータシステムである交流圧力駆動 ER マイクロアクチュエータシステムを提案した. 本章では提案したシステムの一種である交流圧力駆動 ER 屈曲アクチュエータシステムのラージモデルを製作し，特性実験を行うことによる動作原理の検証を目的とする．提案した交流圧力駆動 ER 屈曲アクチュエータシステムの構成要素である交流圧力源，ER バルブ，液圧アクチュエータのラージモデルを NC 工作機械による機械加工によって製作する．ボイスコイルモータを駆動源とした交流圧力源から供給される交流圧力を黄銅製の ER バルブによって同期整流し，可動部長さ 10mm のシリコーンゴム製液圧屈曲アクチュエータを駆動させることによりその特性を検証し，提案したシステムの動作原理の妥当性を検証する.

3.2　原理検証用ラージモデルの試作

第 2 章で提案した交流圧力駆動 ER 屈曲アクチュエータシステムの動作原理の検証のために, 本章では図 3.1 に示すような交流圧力駆動 ER 屈曲アクチュエータシステムのラージモデルを構築する．動作原理検証用のシステムは交流圧力源と 2 個の ER 屈曲アクチュエータのラージモデルによって構成され，アクチュエータには圧力伝達部と ER バルブが組み込まれる.

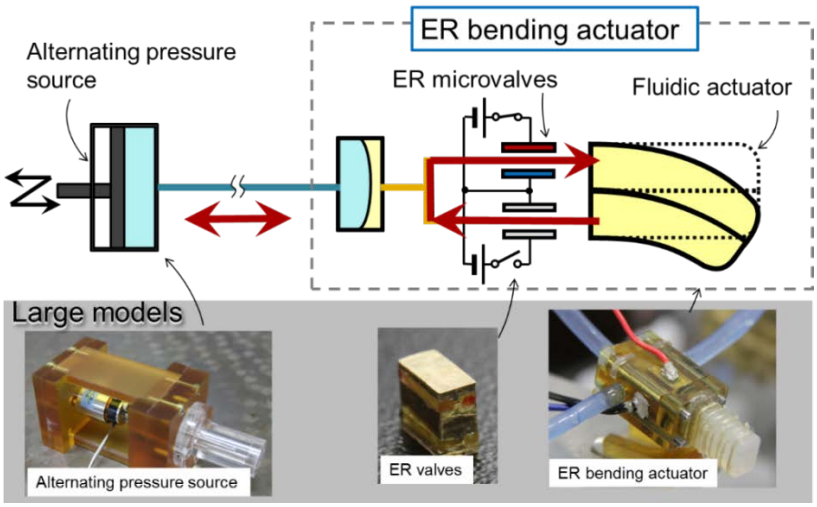


Fig. 3.1 Proposed ER bending actuator system

ラージモデルの設計指針としては，これまで研究されている ER アクチュエータシステム [19-24]の仕様を参考にして動作原理検証にとって妥当となるように以下のように設定した．

i.　交流圧力源から振幅 100kPa，周波数 10Hz の正弦波状の圧力を供給

ii.　i の駆動条件において可動部長 10mm の液圧屈曲アクチュエータ先端がその長さに対して 30%以上の無負荷屈曲変位を 1s の間に出力

3.2.1　交流圧力源ラージモデルの試作

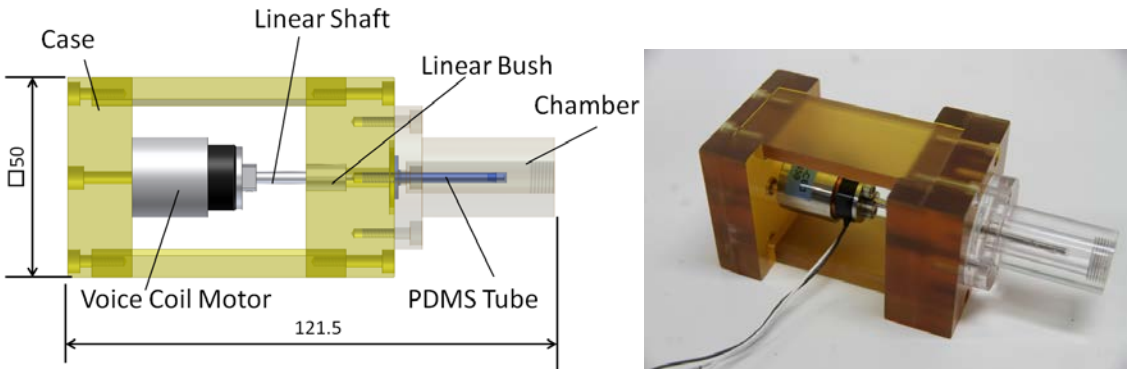
動作原理検証用の交流圧力源ラージモデルの概要と実際に試作したものを図 3.2 に示す．本圧力源はボイスコイルモータにより直動軸をプランジャとして図 3.3 のように往復動させることによって正弦波交流圧力を発生させるものである．ボイスコイルモータは電磁力によりコイルを直動運動させる一種のリニアモータであり，動作がスムーズで可動部が軽量であるため応答性が高く，直動動作が直接取り出せるため交流圧力源を構成するときに単純化が容易であるため，交流圧力源ラージモデルに用いる駆動源として有利である．また，その発生力は通電電流に比例するため，電流に比例した発生圧力を出力することが可能である．

プランジャの往復運動によってポンピングを行う際，軸と軸受の摺動部では水漏れが起こるためこれをシールする必要がある．しかし，使用するボイスコイルモータの発生力は小さいため，シールによってボイスコイルモータの推力や往復動作が損なわれないようにする必要がある．そこで図 3.4 のように，薄いシリコーンゴムチューブで軸を覆うことにより動作流体である水のリークを防止し，シリコーンゴムチューブと軸との間の摩擦力を低減し，動作不良を防止するためにばね定数の小さなコイルばねを軸の外側面に配置した．

ボイスコイルモータは，交流圧力源が振幅 100kPa，周波数 10Hz の正弦波圧力を十分に出力できるように選定し，AVM20-10-C6.3 (Akribis Systems，定格推力 2.18N，ストローク 10mm，推力定数 2.00 N/A，機械時定数 7ms)を採用した．

プランジャの直径を 2.4 mm とすると，交流圧力源ラージモデルが出力できる交流圧力の全振幅値は 0.4 MPa 程度となり，圧力源からアクチュエータまでの液圧管路で圧力損失が生じて，供給される圧力が半分に減衰することを仮定しても，ER アクチュエータに振幅 0.1MPa 以上の正弦波圧力を十分に供給可能となる．また，交流圧力源ラージモデルを周波数 10Hz，ストローク 10mm で動

作させたとき，流量の実効値はおよそ 700 mm³/s となり，後述する液圧屈曲アクチュエータを駆動させるのに十分な出力流量となる．交流圧力源ラージモデルの詳細な設計については付録 A に記述している．



(a) Drawing　　(b)Photocopy

Fig.3.2 Schematics of alternating-pressure source

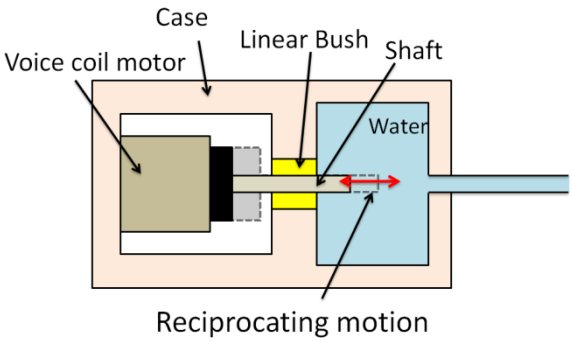


Fig. 3.3　Schematic of alternating pumping

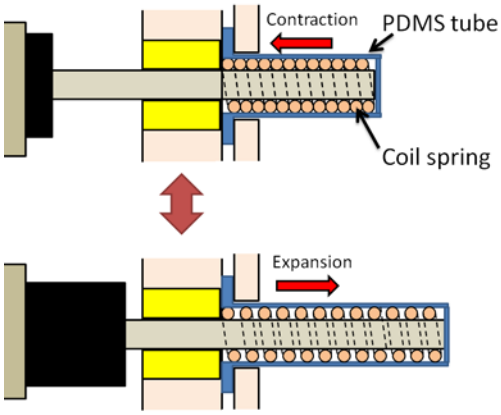


Fig. 3.4 States of reciprocating motion

3.2.2　ER バルブの試作

動作原理検証のための ER 屈曲アクチュエータシステムラージモデルでは ERF として低分子ネマティック液晶 MLC-6457-000 (Merck Ltd., Japan，基底粘度 23 mPa･s)を使用することとする．以前の研究においてシリコン ER マイクロバルブを用いた MLC-6457-000 の特性実験が行われており，ER 効果の大きさ κ_{ER}=7，バンド幅 20Hz 以上であることが確認されている [26]．この実験結果を参考にして ER 屈曲アクチュエータラージモデルに組み込む ER バルブの流路部寸法を決定した．ER バルブの設計においては，差圧が 100kPa のときに

ERF の基底粘度(23mPa·s)における流量を 120 mm³/s として制御可能な流量が 120×(κ_{ER}-1)/ κ_{ER} =100 mm³/s となるように流路の寸法を電極間隔 H_{ER}＝150μm，流路幅 B_{ER}＝700μm，流路長 L_{ER}＝8mm とした．

ER バルブの概要図を図 3.5 に示す．提案するシステムラージモデルに用いる ER バルブは機械加工によって製作し，電極部に黄銅，スペーサにポリエーテルイミド(クオドラントポリペンコジャパン株式会社製 UL-1000)を用いて，エポキシ接着剤によって両者を接着して組み立てた．製作した ER バルブの写真を図 3.6 に示す．製作した 2 個の ER バルブ（ERV1，ERV2）の流路の両端部を顕微鏡で観察して測定した流路寸法を表 3.1 にまとめて示す．

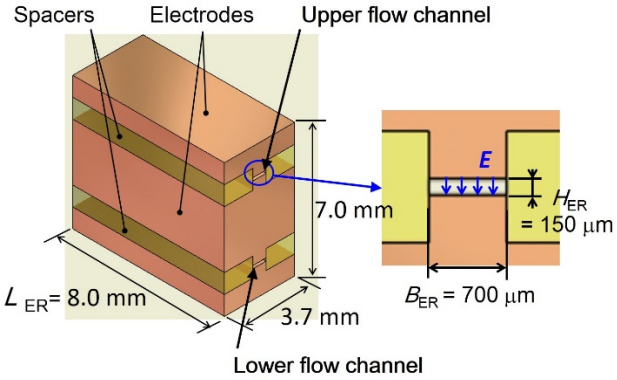
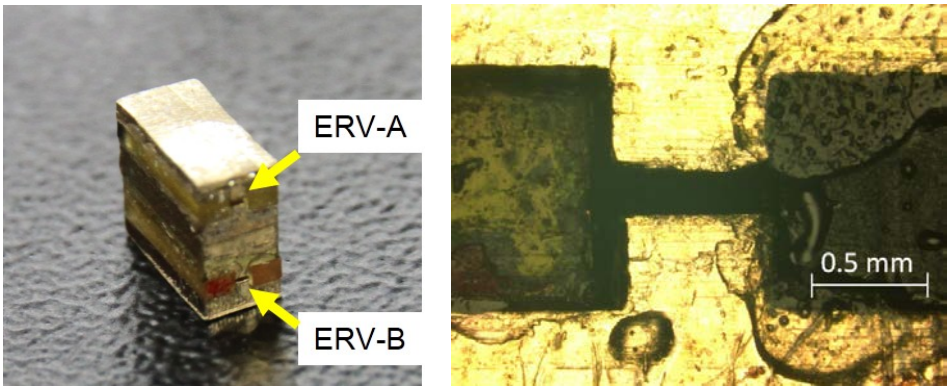


Fig. 3.5 Schematics of ER valve



(a) Overall view　　(b) Channel

Fig. 3.6 Photocopy of ER valve

Table 3.1 Measured size of flow channels

	Upper flow channel				Lower flow channel			
	Front side		Back side		Front side		Back side	
	Height [μm]	Width [μm]	Height [μm]	Width [μm]	Height [μm]	Width [μm]	Height [μm]	Width [μm]
ERV1	138	687	174	687	146	664	145	660
ERV2	165	671	165	692	158	643	165	673

製作した ER バルブを用いて，静特性実験を行った．静特性実験の手順について以下に示す．

ER バルブ静特性実験

実験装置の概略図を図 3.7 に示す．特性実験を行う際，前準備として気泡を流路内に残さないようにするために装置全体の真空引きをした後， 流路全体を ERF で充満させた．次に，ギアポンプにより ERF を循環させ，まず上流側の絞り弁（V1）で十分な供給圧力を設定した後，下流側の絞り弁（V2）で ER バルブを通過する弁通過流量を調整した． 静特性実験では，高圧電源を用いて ER バルブの電極間に電界を印加し，その際の弁通過流量と弁差圧を測定した．弁通過流量は電子天びんによって単位時間あたりに流出する質量を求め体積流量に換算し， 弁差圧は圧力センサの出力電圧をオシロスコープにより計測し， 圧力センサの校正値を用いて圧力値に換算した．

ERV1 と ERV2 の特性実験にはポンプ側とバルブ側の圧力センサにはそれぞれ長野計器製の KH15（Range：0~1MPa (ポンプ側), 0~0.5MPa (ER バルブ側)）を用いた. 各 ER バルブの静特性実験結果をそれぞれの流路について図 3.8 に示す．それぞれの実験結果において設計値との差があるがこれらの原因としては接着剤が流路内に付着して流路を狭めてしまったこと，電極表面に接着剤が付着することによって ER 効果が低下したことなどが考えられる．製作した 2 個の ER バルブはそれぞれの流路において静特性が若干異なるが，動作原理の検証を行う用途としては支障無いと思われる．

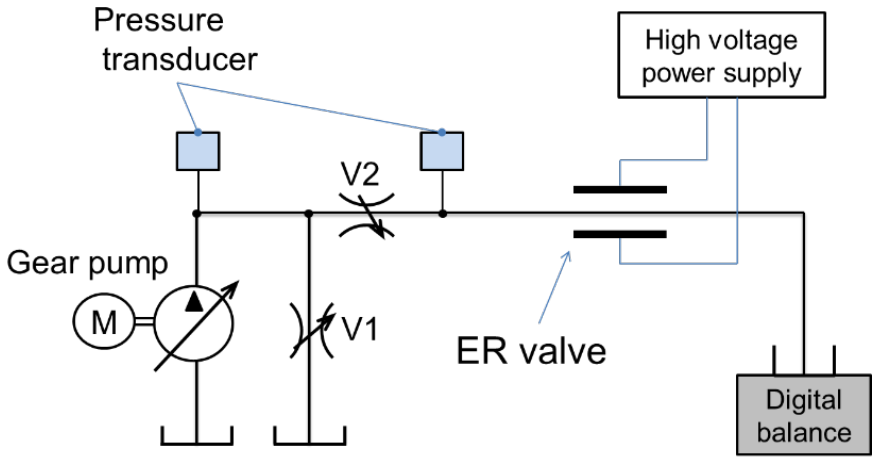
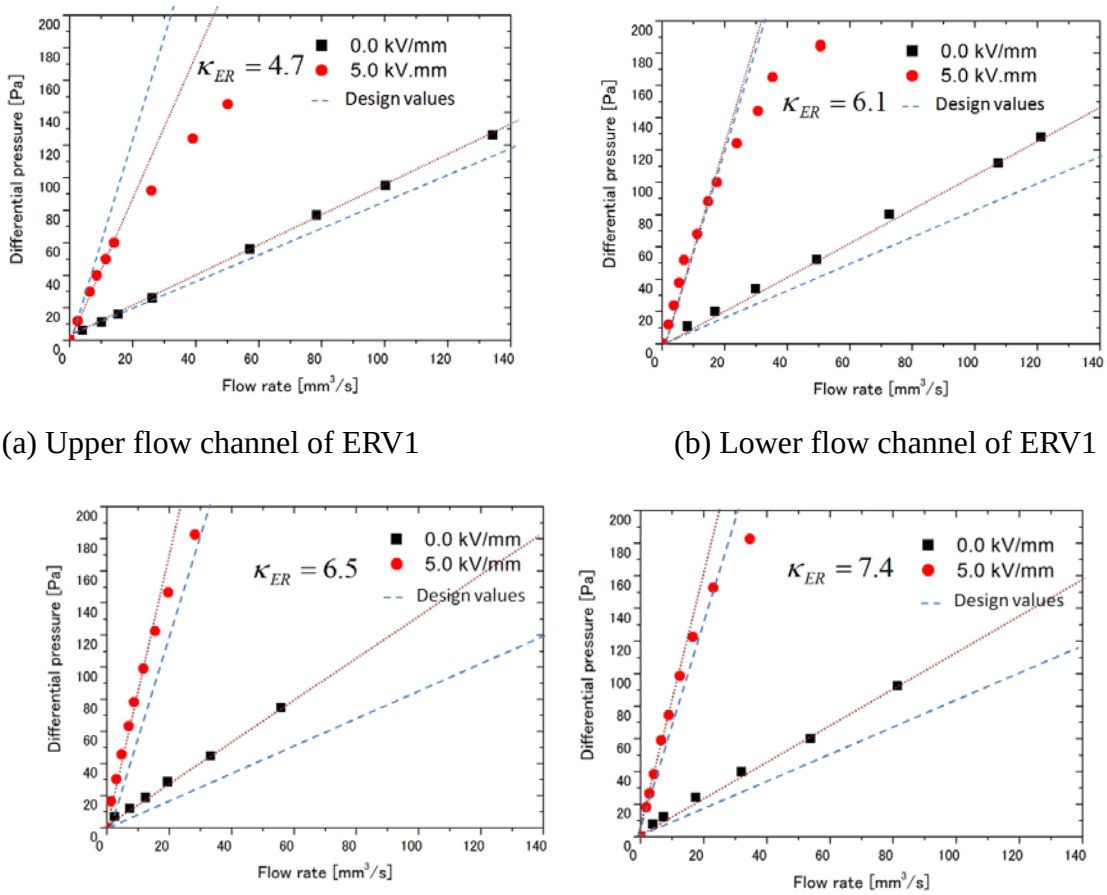


Fig. 3.7 Experimental apparatus for static characteristics



(a) Upper flow channel of ERV1　　(b) Lower flow channel of ERV1

(c) Upper flow channel of ERV2　　(d) Lower flow channel of ERV2

Fig. 3.8 Static characteristics of ER valves

3.2.3　ER 屈曲アクチュエータラージモデルの試作

図 3.9 に動作原理検証のための ER 屈曲アクチュエータラージモデルの概要を，図 3.10 にその写真を示す．ER 屈曲アクチュエータラージモデルは ER バルブ，液圧屈曲アクチュエータと圧力伝達部によって構成される．以下では，シリコーンゴム KE1316（信越化学工業(株)）を材料とした流体屈曲アクチュエータと圧力伝達部の試作について記述する．

シリコーンゴム製液圧屈曲アクチュエータの概要図を図 3.11 に示す．交流圧力源を 10Hz で動作させたときの実効流量 700 mm^3/s に対して，アクチュエータの屈曲動作に関して十分な動特性が得られるようにアクチュエータの液圧室の寸法は 3×4×10 mm^3 とした．また，液圧印加時にアクチュエータ外周部の膨張を抑えて屈曲動作を効率良く出力するためにアラミド繊維(帝人テクノプロダクツ(株)，テクノーラ)をアクチュエータ外周部に巻いて拘束した．シリコーンゴム接着剤(信越化学工業(株)，KE42T)を付着させたアラミド繊維をアクチュエータ外周部に巻きつけてドライオーブンで 90℃，90min 加熱してアクチュエータと繊維を接着した．圧力伝達部には厚さ 0.5mm のシリコーンゴム KE1316 のシートを用いた．

製作した ER バルブ，流体屈曲アクチュエータは PEI (polyetherimide)製の部品とエポキシ接着剤により接着され，ねじによって各部品を固定することによって ER 屈曲アクチュエータラージモデルが組み立てられる．ER バルブへの電気的接続のために図 3.12 に示すように PEI 部品に設けた穴を通して外部との電気的接続を行い，また，アクチュエータ内部への ERF 充填用流路を 2 個設けている．

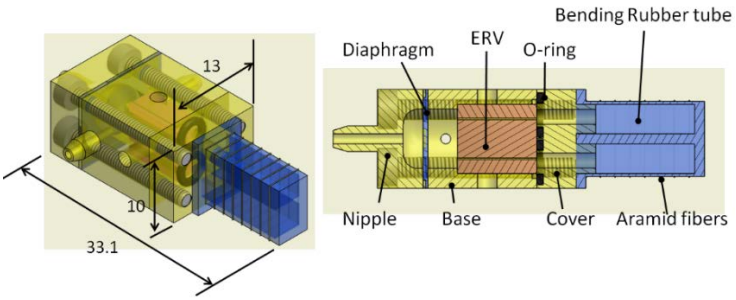


Fig. 3.9 Schematics of ER bending actuator large model

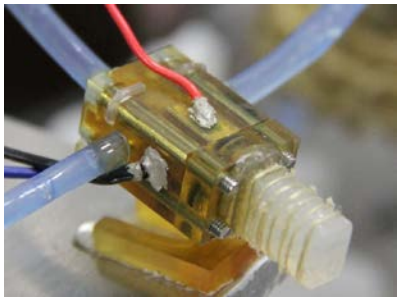


Fig. 3.10 Fabricated actuator large model

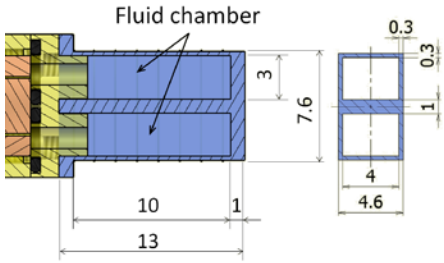


Fig. 3.11 Hydraulic bending actuator part

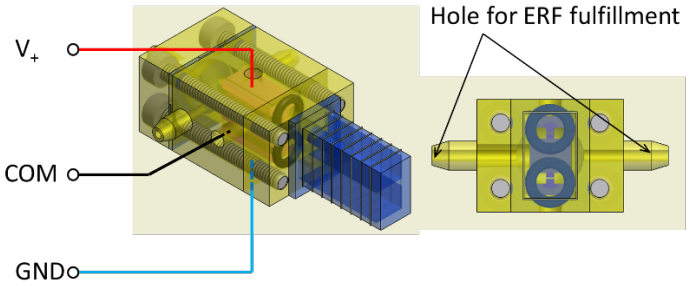


Fig. 3.12 Terminals of ER actuator large model

3.3　ラージモデルによる特性実験

第 3.2 節では交流圧力駆動 ER 屈曲アクチュエータシステムの構成要素である交流圧力源，ER バルブおよび ER 屈曲アクチュエータのラージモデルの試作を行ったが，本節ではそれらを用いて構築する交流圧力駆動 ER 屈曲アクチュエータシステムラージモデルを用いて，本システムの動作原理の検証と変位特性や駆動力について実験を行う．

本節では図 3.13 に示す 2 個のアクチュエータラージモデルを使用して特性実験を行う．第 3.2 節において製作した 2 個の ER バルブ，ERV1 と ERV2，を用いて構築したアクチュエータラージモデルをそれぞれアクチュエータ A，アクチュエータ B と呼ぶこととする．

また，ラージモデルを用いた特性実験における高電圧アンプから各アクチュエータラージモデルへの電圧印加について図 3.14 に示す．アクチュエータラージモデルの GND 端子を基準として，V_+端子に印加したい大きさの直流電圧 V_{HV} を，COM 端子に全振幅 V_{HV} の方形波電圧を印加することで，ER バルブの各流路への電界印加を行う．

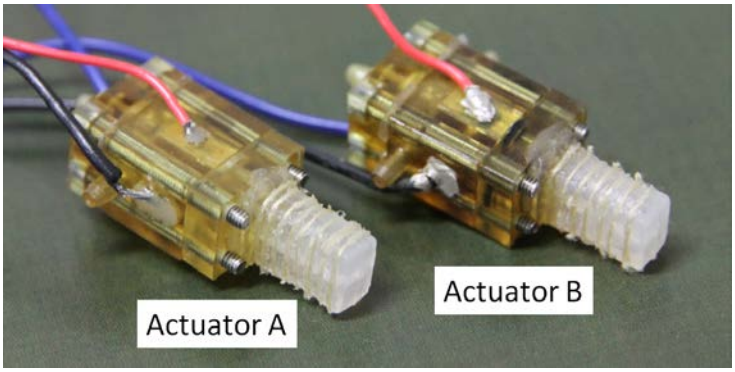


Fig. 3.13 ER bending actuator large models for verification of the working principle

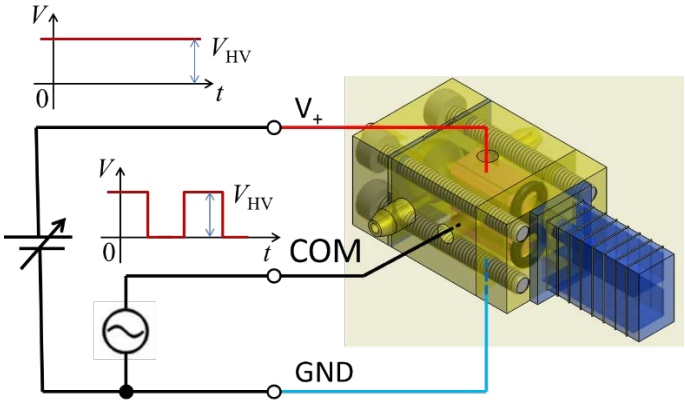


Fig. 3.14 Electrical connections of ER actuator large model

図 3.15 は今回の特性実験を行う際の，実験装置全体の概略図である．この特性実験では電圧-電流変換を行う駆動回路から交流圧力源のボイスコイルモータへの印加電流 I_{VCM} をその振幅を I_0，直流成分を I_b，周波数を f とするとき

$$I_{\mathrm{VCM}} = I_0 \sin 2\pi f + I_b \tag{4.1}$$

として与えている．また，ER バルブへは最大電界強度 5kV/mm となるように高電圧アンプから方形波電圧 Vを印加した. 交流圧力源への印加電流 I_{VCM} と ER バルブへの方形波電圧 Vは PC 上の駆動プログラムによって制御される．駆動回路と高電圧アンプに対して PC から D/A 変換した電圧を入力することで交流圧力源への印加電流に比例した正弦波圧力 P_{in} と ER バルブへの印加電圧 Vを同期させて ER 屈曲アクチュエータラージモデルを動作させる．

実験の前準備としてアクチュエータシステムラージモデル内の流路に動作流体を充填し気泡を残さないようにするために装置全体の真空引きを行う．また，ER 屈曲アクチュエータラージモデルと交流圧力源の接続には内径 2.5 mm, 外径 4 mm，長さ約 600 mm のナイロンチューブを用いた．動作流体となる ERF は低分子ネマティック液晶 MLC-6457-000，交流圧力源からの供給圧力圧力 P_{in} を測定する圧力センサには長野計器製 KH15（測定レンジ：0~1MPa）を用いた．

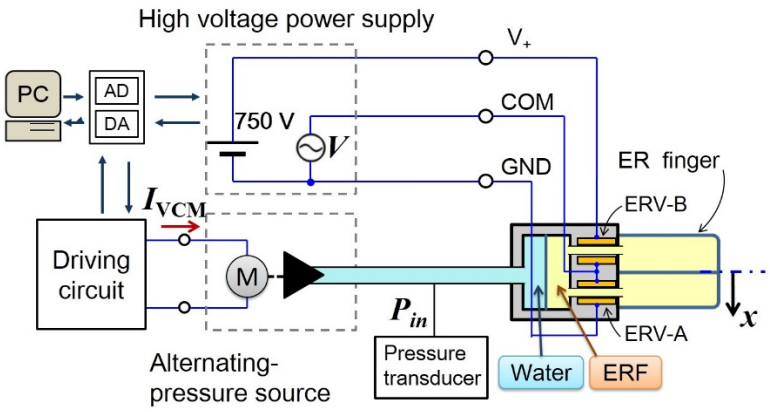


Fig. 3.15 Experimental apparatus for verification of motion

3.3.1　変位特性と最大発生力

アクチュエータ B を用いて交流圧力駆動 ER 屈曲アクチュエータシステムを動作させたときの印加電流 I_{VCM}, 交流圧力 P_{in} と印加電圧 V の測定結果を図 3.16 に，アクチュエータラージモデルの変形の様子を図 3.17 に示す．このとき，交流圧力源への印加電流 I_{VCM} を I_0=0.372A，I_b=0.372A，f=10Hz とすることで，全振幅 110 kPa の交流圧力を供給し，ER バルブの COM 端子へ入力する方形波電圧の全振幅 V_{HV} は，電界強度 E=5kV/mm を流路高さ H_{ER}=150μm の ER バルブに与えるために $V_{HV} = E \times H_{ER}$ = 750 V とした. 交流圧力 P_{in} は印加電流 I_{VCM} に対して若干の位相の遅れと波形の歪が生じているが動作原理検証には大きな支障は無い．また，図 3.17(a)に示されるようにアクチュエータラージモデルにはバイアス圧力が加えられているため，バイアス圧力無しの場合のアクチュエータ可動部の全長 11mm に対して 30kPa 程度のバイアス圧力を加えた状態では 16.4mm 程度に伸長する.

上述の条件の特性実験により，全振幅 110 kPa の交流圧力の下でアクチュエータラージモデルはその先端中心部の上下に両方向変位を出力し，その最大値は，図 3.17 に示すように，下側に 7mm，上側に 10mm となった．また，アクチュエータラージモデル先端の変位 x と交流圧力と方形波電圧の位相差の時間変化を図 3.18 に示す．ER バルブへの電界印加は 23s と 68s の時点で位相を反転させており，図 3.18 ではそれらの時点で屈曲方向が反転することが示されている. つまり, 交流圧力と電界印加の位相差を制御することで変位の方向を切り替えることが可能であることが確認される．本実験構成を用いて駆動周波数

10Hz 以上の特性実験も行われたが，20Hz 以上の周波数ではアクチュエータ先端の屈曲速度が周波数を増加させるにしたがい遅くなることが確認された．これは ER バルブと交流圧力源の周波数応答性の問題だと考えられる．

また，アクチュエータ B を用いたシステム動作時のアクチュエータの発生力について特性実験を行った．発生力測定のために，図 3.19 に示すように電子天秤に対して ER 屈曲アクチュエータの固定を行った．本実験では交流圧力源への入力電流 I_{VCM} の振幅 I_0 と周波数 f を変化させてアクチュエータの発生力を測定する．アクチュエータ先端を下方に屈曲させたときの発生力 F_{ER} の測定結果を示す図 3.20 を見ると，振幅 I_0 が 0.12A までは発生力は電流すなわち供給圧力の増加に比例しているが，約 0.1N で曲線が飽和している．また，測定した最大発生力は約 0.11N である．

図 3.18 は試作した ER 屈曲アクチュエータラージモデルの動特性を示すグラフであるが，立ち上がり時間 20s 程度となっておりラージモデルの変位の応答性が非常に遅いことがわかる．これは ER バルブへの電界印加に対する弁差圧の応答が遅いことおよびシリコーンゴム製液圧屈曲アクチュエータの剛性が低く加圧時の膨張が当初予想したものより大きくなったことが原因と思われる．しかし，ER 屈曲アクチュエータの応答性は ER バルブの流路寸法を調整することによって，容易に高くすることが可能である．例えば，ER バルブの流路幅を広くすることによって，流体屈曲アクチュエータへの流量を増加させることができ，それにより高速化が行われる．

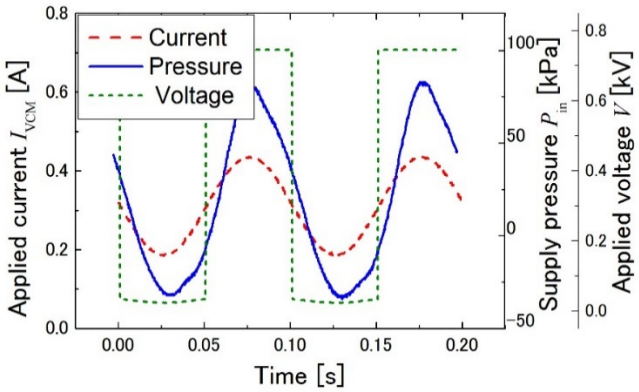
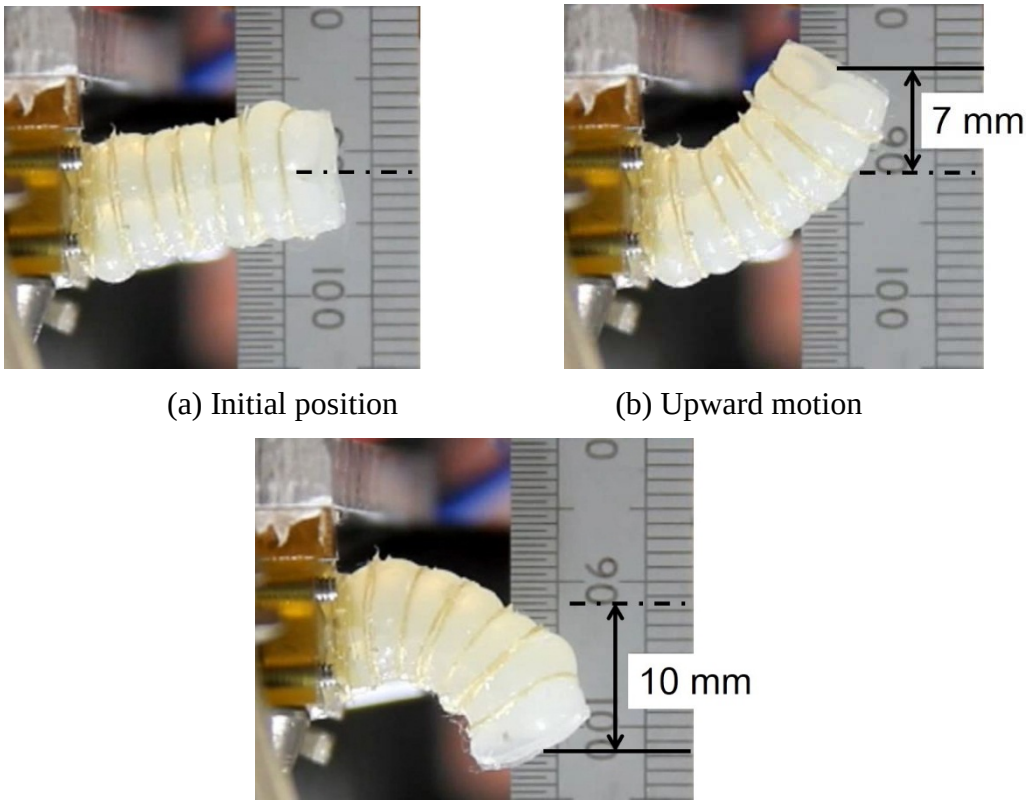


Fig. 3.16 Measured supply pressure



(a) Initial position　(b) Upward motion

(c) Downward motion

Fig. 3.17　Bending motion of the ER bending actuator large model

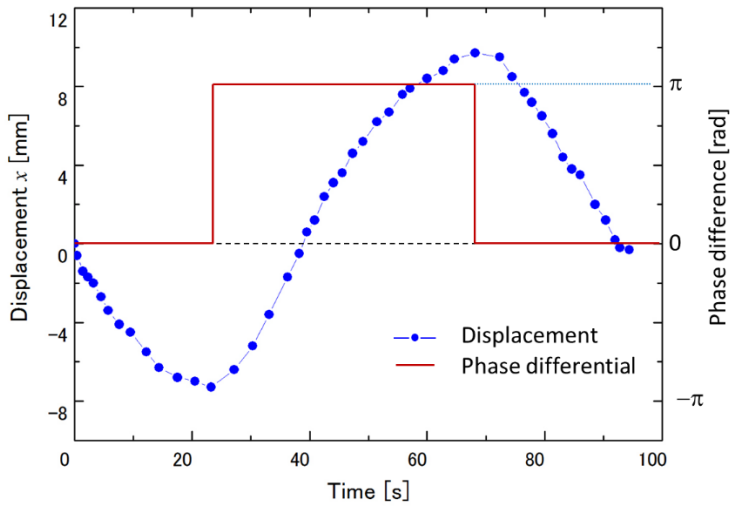


Fig. 3.18 Measured tip displacement of the ER actuator large model

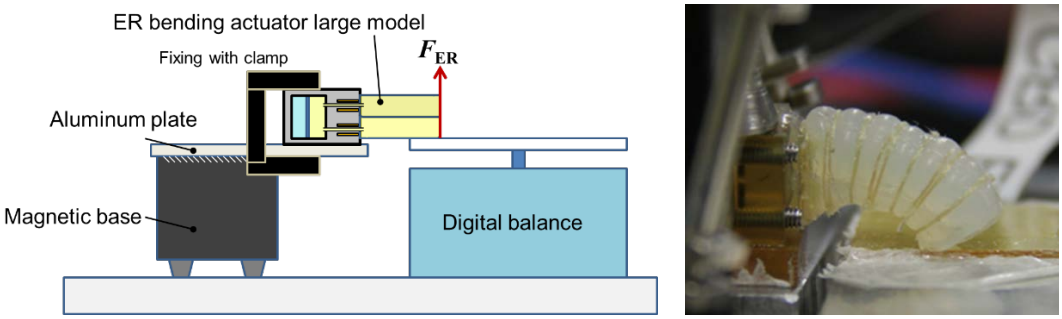


Fig. 3.19 Experimental setup for output force measurement

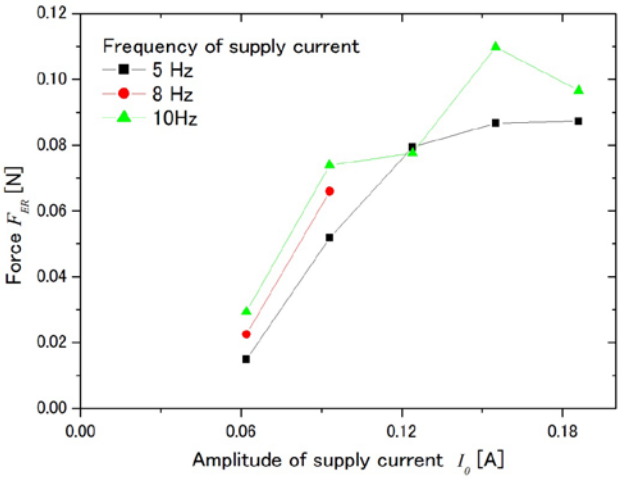


Fig. 3.20 Force curve at each frequency

3.3.2　並列駆動実験による多自由度化の検証

3.3.1 節では，構築した交流圧力駆動 ER 屈曲アクチュエータシステムのラージモデルの動作原理が 1 個のアクチュエータラージモデルの特性実験を通して検証された．本節では提案するシステムが多自由度アクチュエータシステムとして動作可能かどうかを検証するために複数のアクチュエータの同時駆動実験を行う．実験のためにアクチュエータ A とアクチュエータ B を図 3.21 に示すように配置，固定してグリッパを構成した．本節では構成したグリッパを ER グリッパと呼ぶこととする．ER グリッパの写真を図 3.22 に，特性実験の概要を図 3.23 に示す．

3.3.1 節で述べた特性実験と同様に実験の準備を行い，交流圧力源への印加電流 I_{VCM} を I_0=0.155A，I_b=0.186A，f=5Hz とすることで，各アクチュエータに全振幅 90 kPa の交流圧力を供給した．また，各 ER バルブに位相差を与えた電界

を印加して各アクチュエータの屈曲動作の方向を制御した．

入力電流 I_{VCM}，交流圧力 P_{in} と印加電圧 V の測定結果を図 3.24 に，アクチュエータ A,B それぞれの ER バルブへの印加電圧の位相差を制御してシステムを動作させたときの ER グリッパの動作を図 3.25 にまとめて示す．本実験によって，ER グリッパに用いた 2 個のアクチュエータ A，B は，交流圧力の供給下で各 ER バルブへの電界印加の位相を制御することによってそれぞれ独立して動作可能であることが確認でき，つまり提案する交流圧力駆動 ER 屈曲アクチュエータシステムが多自由度システムに適用できることが実証された．図 3.26 は ER グリッパを用いて質量 6.3g の M6×20 のステンレス製ボルトを持ち上げた様子である．ボルトを掴んだ後に ER グリッパを垂直に持ち上げる作業は手動で行っている．

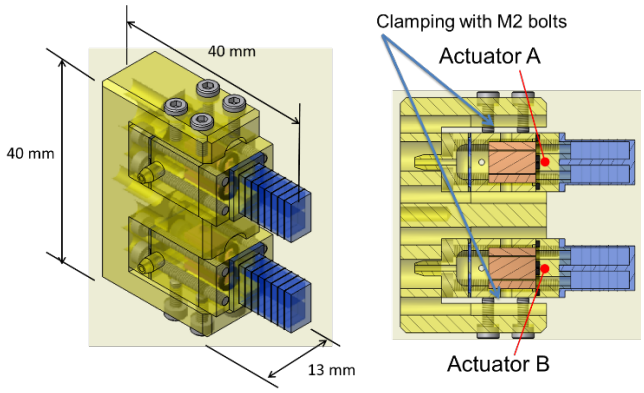


Fig. 3.21 Schematics of ER gripper

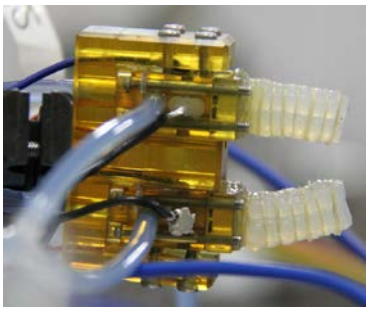


Fig. 3.22 Photocopy of ER gripper

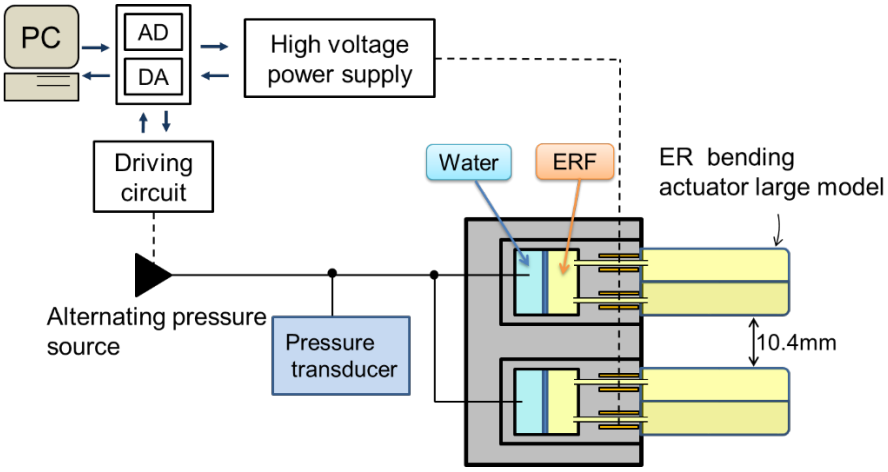


Fig. 3.23 Experimental apparatus for verification of motion

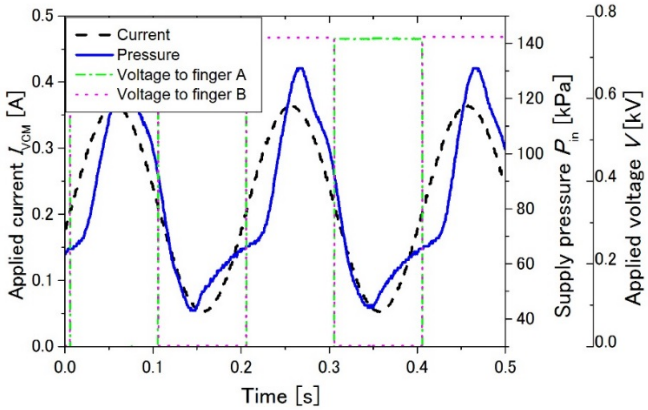


Fig. 3.24 Measured time variations of supply pressure, current and voltage

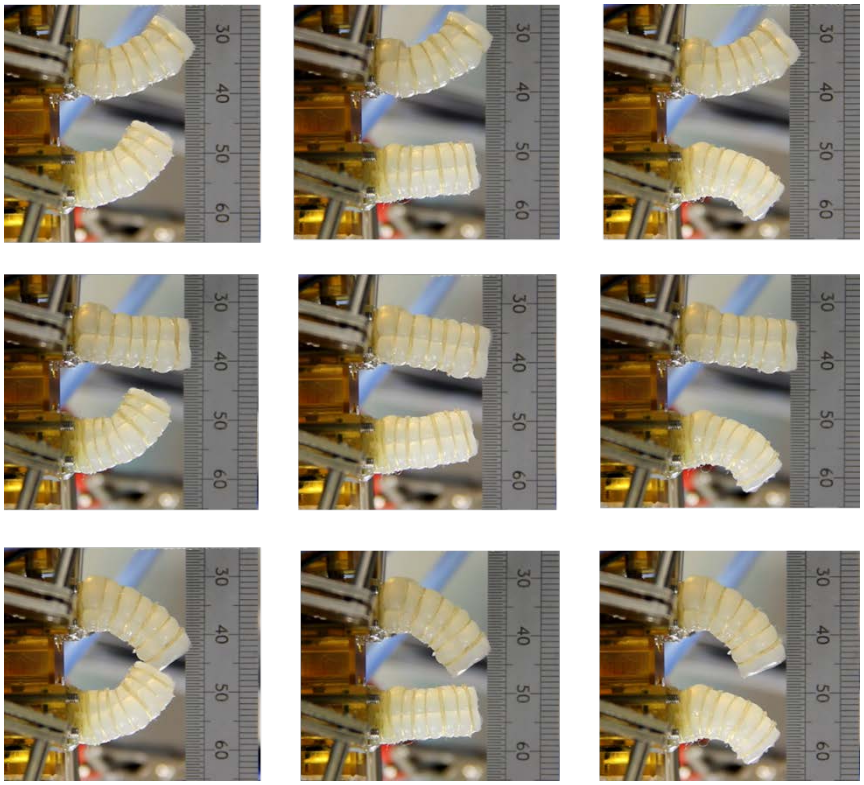
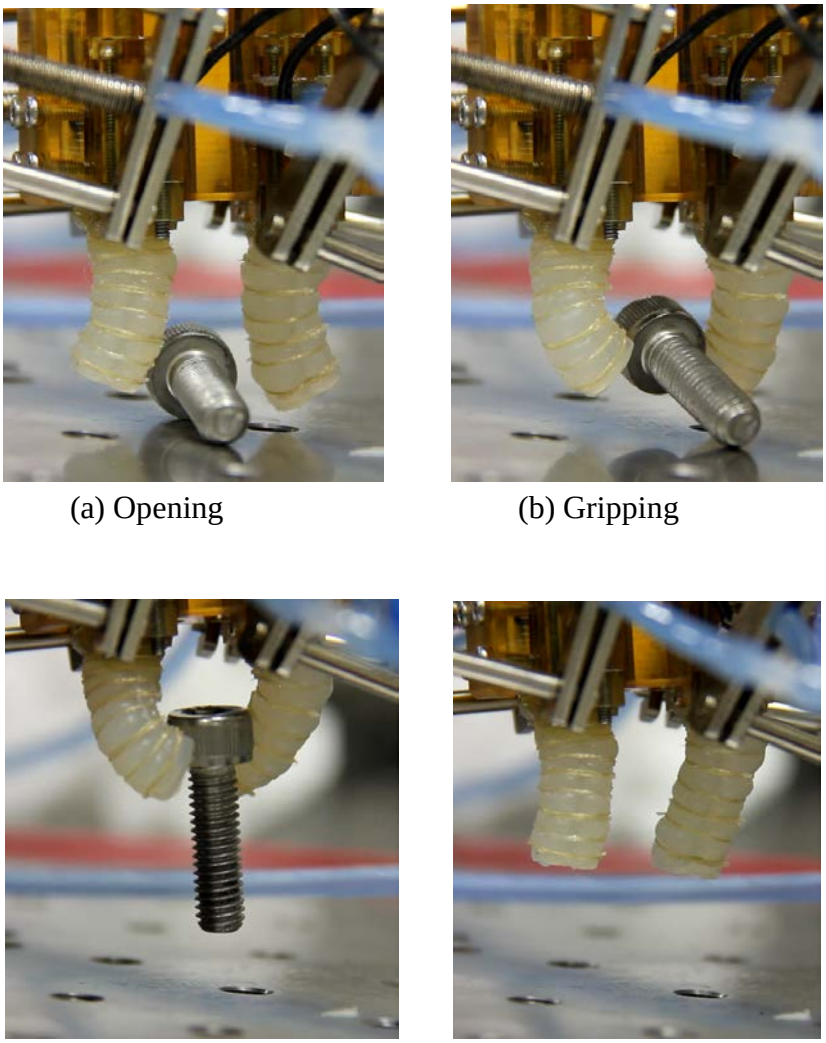


Fig. 3.25 Motions of fabricated ER gripper with actuators A and B



(a) Opening　(b) Gripping

(c) Lifting　(d) Release

Fig.3.26 Gripping motion of the ER gripper

3.4　結言

本章では，第 2 章で提案した交流圧力駆動 ER 屈曲アクチュエータシステムのラージモデルを試作し，特性実験を行うことにより動作原理の検証を行った．

提案する交流圧力駆動 ER 屈曲アクチュエータシステムの構成要素である交流圧力源，ER バルブ，ER 屈曲アクチュエータのラージモデルを NC 工作機械による機械加工によって製作した．試作した ER バルブについては，従来の ER マイクロバルブと同等の静特性を有することを特性実験により確認した．

試作したラージモデルを用いて動作原理検証を行った．ボイスコイルモータを駆動源とした交流圧力源から供給される全振幅 110kPa の交流圧力と ER バルブへの全振幅 750V の方形波電圧印加を同期させることにより，可動部長さ

11 mm のシリコーンゴム製流体アクチュエータ部を有する ER 屈曲アクチュエータラージモデルの動作が確認された．特性実験ではバイアス圧力によってアクチュエータ可動部長さが 16mm に伸長した状態で上下方向にそれぞれ 7mm, 10mm の先端変位が出力され, 提案したシステムの動作原理が検証された. また, 多自由度システムとして ER アクチュエータラージモデル 2 個を用いた ER グリッパが構築され，その動作が確認された．その結果，提案する交流圧力駆動 ER 屈曲アクチュエータシステムが管内検査マイクロロボットのような多自由度システムに適用可能であることが実証された.

第 4 章 MEMS 技術を用いた 1 自由度 ER 屈曲アクチュエータ[27]

4.1　緒言

第 3 章では, 本論文が提案する交流圧力駆動 ER 屈曲アクチュエータシステムの動作原理が機械加工によって試作されたラージモデルにより実証されたが, 直径 10mm 以下の細管内で作業可能なマイクロロボット実現のためには各部のマイクロ化を可能とする製作技術が必要となるため，MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)微細加工技術の適用が有効である．実際に，ER マイクロバルブは MEMS 微細加工の一種であるシリコンマイクロマシニングにより実現されている[18, 20, 22]. 交流圧力駆動 ER 屈曲アクチュエータシステムは ER 屈曲アクチュエータと交流圧力源によって構成され，ER 屈曲アクチュエータは液圧屈曲アクチュエータ部，ER マイクロバルブと圧力伝達部から成るのであるが，マイクロサイズの ER 屈曲アクチュエータに適する液圧屈曲アクチュエータ部や圧力伝達部の MEMS 技術による試作はいまだ行われていない.

本章では MEMS 技術を用いた交流圧力駆動 1 自由度 ER 屈曲アクチュエータを試作する. 両方向への 1 自由度動作を実現する ER 屈曲アクチュエータの実現のために，まず PDMS 製の液圧屈曲アクチュエータ部の試作を行う．また，動作流体である ERF の選定を行った後に，シリコンマイクロマシニング技術を用いて製作される ER マイクロバルブと圧力伝達部をそれぞれ試作し 1 自由度 ER 屈曲アクチュエータを構築する．さらに，構築した MEMS ベースの ER 屈曲アクチュエータを用いて実験系を構築して実験を行い，その特性を明らかにする.

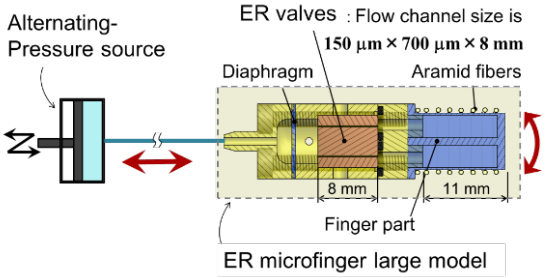
4.2　液圧屈曲アクチュエータ部の試作

交流圧力駆動 ER 屈曲アクチュエータシステムでは，交流圧力を ER マイクロバルブで同期整流して液圧屈曲アクチュエータ部の液圧室間に差圧を発生させることで屈曲変位が出力される．ER マイクロバルブを用いた交流圧力の整流によって生じる差圧を効率的に ER 屈曲アクチュエータの変位に変換して大変位，高速動作を実現するためには，アクチュエータ部は軸方向には伸長しやすく，径方向には膨張しにくい構造とする必要があり，また，その素材にはゴムのようなヤング率の小さいものを用いることが望ましい．第 3 章では図 4.1(a)に示すように長さ 11mm のシリコーンゴム製屈曲アクチュエータ部の側面にアラミド繊維を手作業で巻き付けて接着させることによって径方向への膨張を抑制して上下両方向へ 7mm 以上の先端変位を実現した．しかし，例えば長さ 1 mm 程度の小形のアクチュエータへの手作業によるアラミド繊維の巻き付けは非常に困難な作業となりラージモデルの試作に用いた従来手法はマイクロアクチュエータの製作方法として適さない．そのため，液圧屈曲アクチュエータ部の構造は

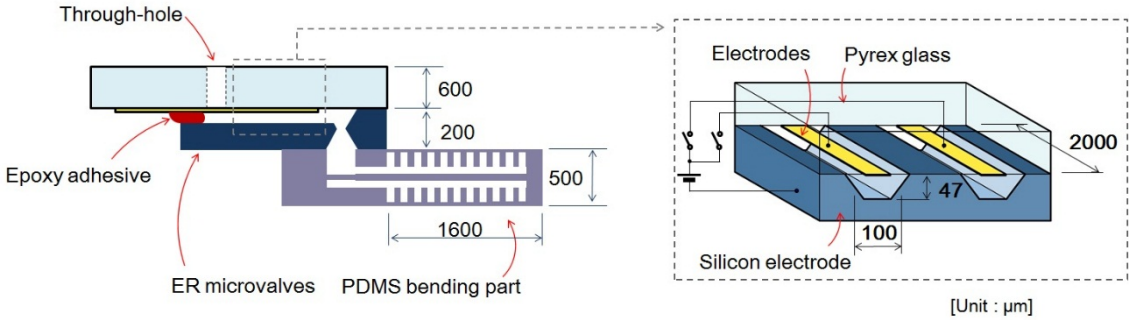
その製作プロセスも含めてマイクロ化に適合する必要がある．

マイクロ化に適した液圧屈曲アクチュエータ部の概要について図4.1(b)に示す．提案する構造では，並列に 2 個並んだ長方形断面の液圧室内に補強壁を等間隔に複数設けることによって液圧室に圧力を印加したときのアクチュエータ部側面の膨張をその幾何形状によって抑制し，大変位，高速動作が実現される．各補強壁には長方形の穴を設けてあり，液圧室内の ERF の流路としている．ER 屈曲アクチュエータの可動部長さについては, ラージモデルでは 11 mm であったが, MEMS 微細加工による試作によって 1.6 mm となるようなマイクロ化を行う．

小形の流体アクチュエータ，特に空気圧アクチュエータはソフトリソグラフィ技術を用いた製作プロセスによって数多く開発されている [28-31]．それらの小形流体アクチュエータの素材には微細なパターンの転写性能に優れるシリコーンゴムの一種である PDMS (poly(dimethylsiloxane))が多く用いられる．提案する液圧屈曲アクチュエータ部が有する複数の補強壁はその厚さに対する高さのアスペクト比が大きく，さらに液圧室が 2 個並列に積み重なった形状となるため PDMS の高アスペクト比 3D 構造体を製作する必要がある．しかし，これまでにソフトリソグラフィ技術を用いて製作されてきた流体アクチュエータのほとんどの場合において，高アスペクト比構造を有する PDMS 構造体は実現されていない．そこで本章では，高アスペクト比構造を有する PDMS のマイクロ 3D 構造体の実現のためにフォトレジストのマイクロ鋳型を用いた新しい PDMS 成形プロセスを開発する．



(a) Large model



(b) Proposed micro actuator system

Fig. 4.1 Comparison of ER bending actuator systems using alternating pressure source

4.2.1　FEM 解析に基づいた液圧屈曲アクチュエータ設計

MEMS 微細加工によって製作する液圧屈曲アクチュエータ部の幾何形状について FEM 解析に基づき検討を行う．本シミュレーションでは図 4.2 に示すように屈曲アクチュエータ部の可動部のみを取り出して解析モデルとした．可動部根元の固定端から液圧室内壁の先端までの長さを 900μm で固定して，各部の幾何寸法をパラメータとして変化させたときの先端変位との関係をシミュレーションにより求めた．上側の液圧室に 50kPa，下側の液圧室に-50kPa を加えて液圧室間で 100kPa の差圧となるように印加圧力を設定する．また，アクチュエータ部の材質は PDMS とするのであるが, 本シミュレーションではヤング率 0.5 MPa, ポアソン比 0.49，密度 1000 kg/m^3 の線形弾性材料と仮定して，シミュレーションソフトウェア COMSOL Multiphysics を用いて解析を行っている．

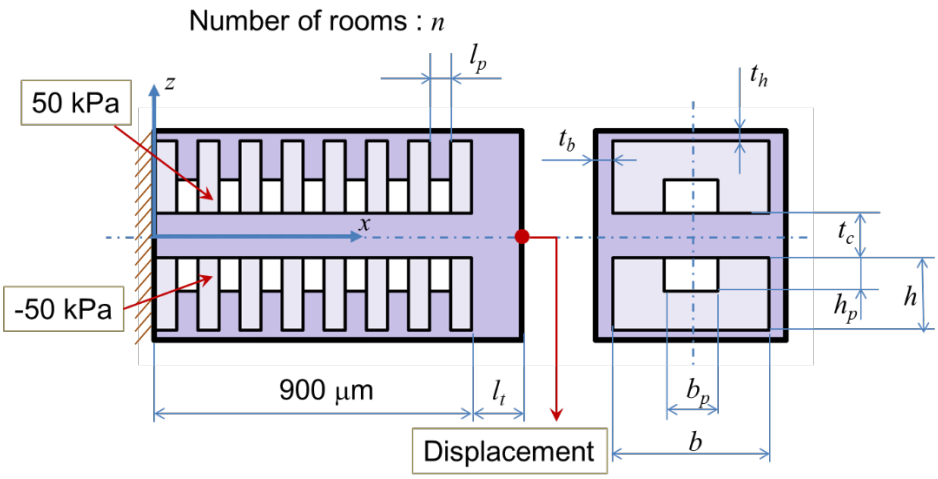


Fig. 4.2 Simulation model of finger part

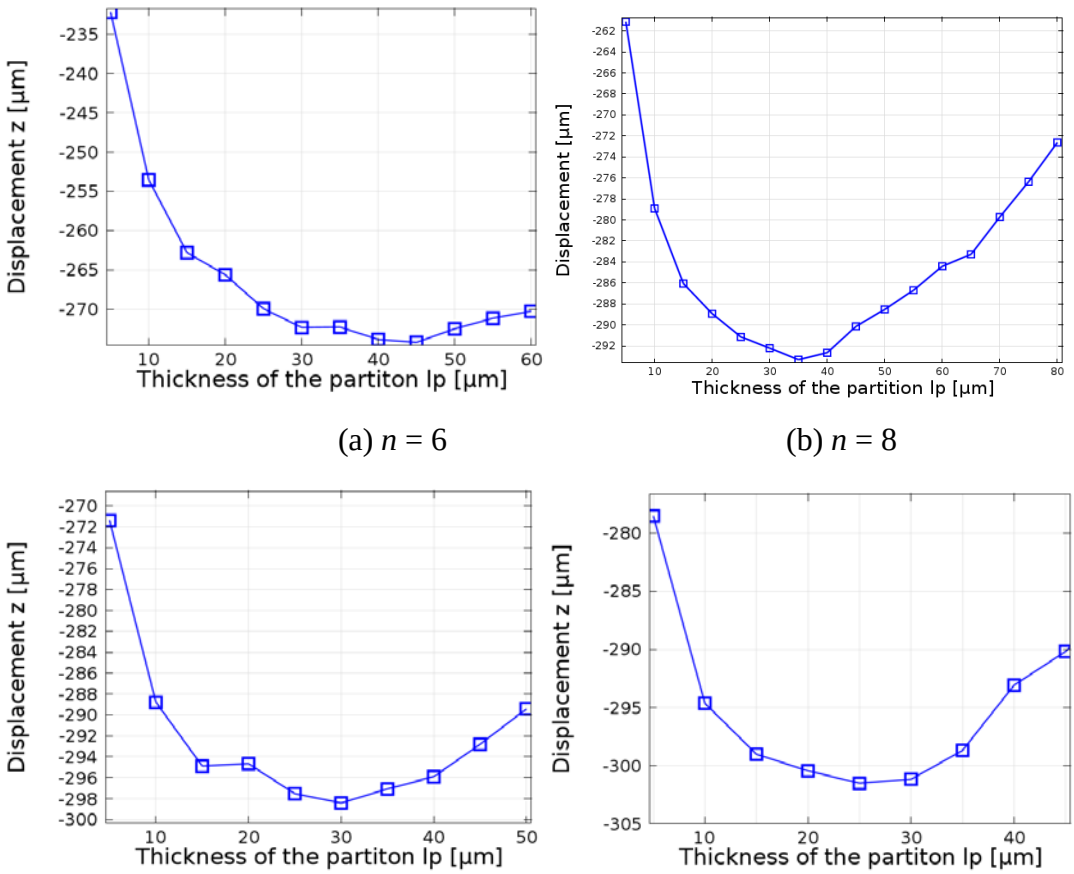
<u>液圧室の部屋数 n とひだの厚さ l_p についての検討</u>

補強壁によって区切られた液圧室の部屋数 n と補強壁の厚さ l_p を変化させたときの屈曲アクチュエータ先端変位 z についてシミュレーションを行う．液圧室の部屋の数 n は 6, 8, 10, 12 と変化させ，補強壁の厚さ l_p は 5μm から 5μm ずつ増加させていき，先端変位 z との関係を求める．そのほかのパラメータについては表 4.1 のように設定する． 図 4.3 の各解析結果からそれぞれの部屋数 n について先端変位 z の極値が存在していること，またそれら先端変位の極値の絶対値は部屋の数 n の増加に伴って増加していることが確認できる．フォトレジストのマイク

ロ鋳型を用いた PDMS 成形における離型処理の段階を考慮すると PDMS 補強壁とネガティブフォトレジスト鋳型両方に強度が必要となり，液圧室の部屋数が多いものは少ないものと比べて補強壁の厚さが小さくなるため，補強壁の強度の確保のため部屋数 n は 8 とする．n = 8 のシミュレーションにおいて l_p =35 μm のとき変位の大きさが最大となるが，図 4.4 に示すように l_p =35 μm のときは液圧室側面の膨張が l_p =70 μm と比較すると大きなものとなっており，アクチュエータ部に生じる最大ミーゼス応力は図 4.5 に示すようにそれぞれ 0.73 MPa, 0.43 MPa となって補強壁の厚さが大きくなるほど最大ミーゼス応力が小さく抑えられる．以上から，変位量と応力の両方を考慮し n = 8,　l_p = 68 μm と設定する．

Table 4.1 Parameters for simulations

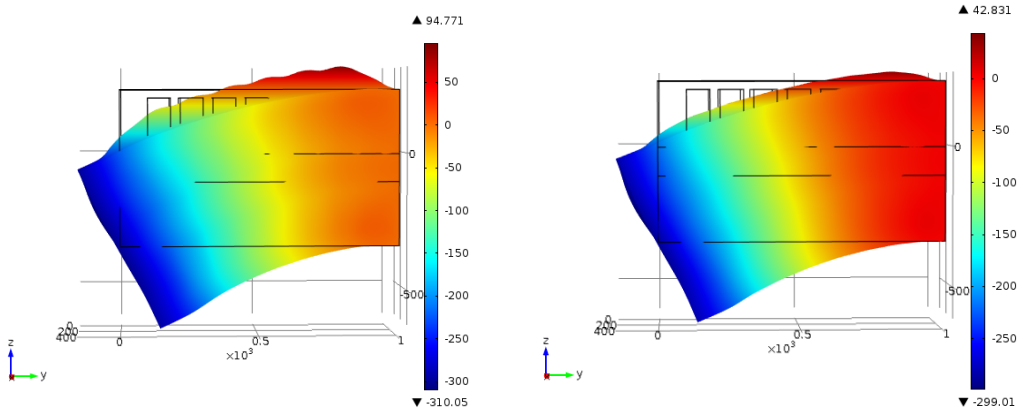
parameters	l_p	h	b	b_p	h_p	t_b	t_h	t_c	l_t
value [μm]	5 ~ 80	200	440	150	100	30	30	100	100



(a) n = 6　　(b) n = 8

(c) n = 10　　(d) n = 12

Fig. 4.3 Simulated diplacement for n and l_p



(a) l_p = 35 μm　　(b) l_p = 70 μm

Fig. 4.4 Simulated displacement of finger part at n = 8

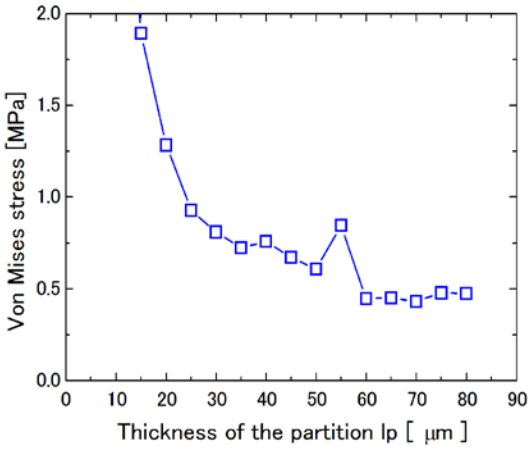


Fig. 4.5 Simulated Von Mises stress for l_p

<u>屈曲アクチュエータ部の各パラメータについての検討</u>

流体屈曲アクチュエータ部の各パラメータを表 4.2 に示すように変化させてシミュレーションを行う. このとき可動部先端の厚さ l_t のシミュレーションにおいてのみ, 厚さ l_t を変化させることによってアクチュエータ可動部の全長も変化するので，先端変位 z ではなく図 4.6 の点 A(固定端から長さ方向に 900μm の位置のチャンバの端部)における z 方向の変位についてシミュレーションを行った.

Table 4.2 Parameters for simulations from case 1 to case 8

Parameters	l_p	h	b	b_p	h_p	t_b	t_h	t_c	l_t
Units	μm								
Case 1	68	140 to 300	440	150	100	30	30	100	100
Case 2	68	200	300 to 600	150	100	30	30	100	100
Case 3	68	200	440	60 to 300	100	30	30	100	100
Case 4	68	200	440	150	50 to 150	30	30	100	100
Case 5	68	200	440	150	100	10 to 50	30	100	100
Case 6	68	200	440	150	100	30	10 to 50	100	100
Case 7	68	200	440	150	100	30	30	20 to 140	100
Case 8	68	200	440	150	100	30	30	100	40 to 160

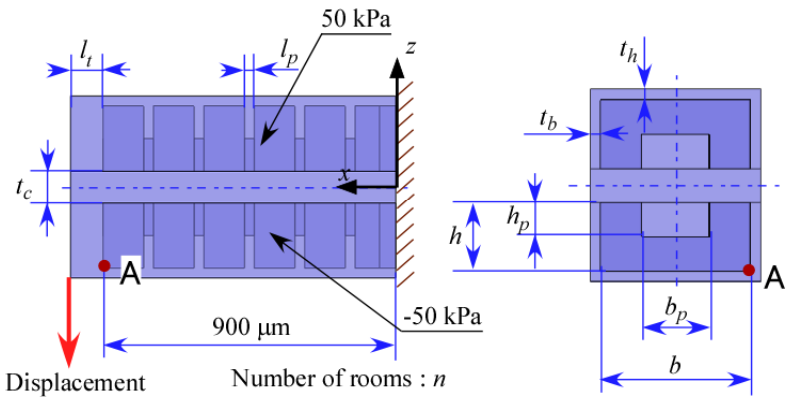
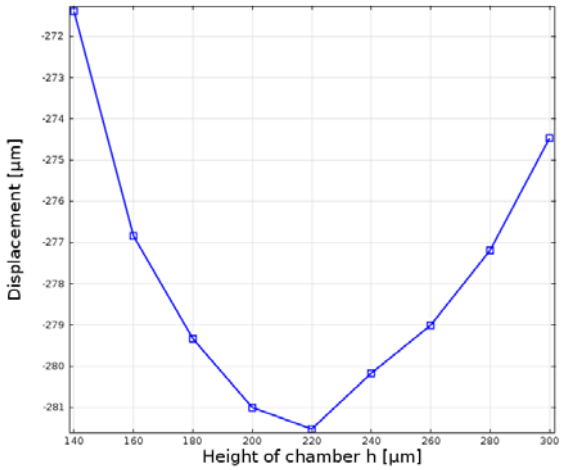
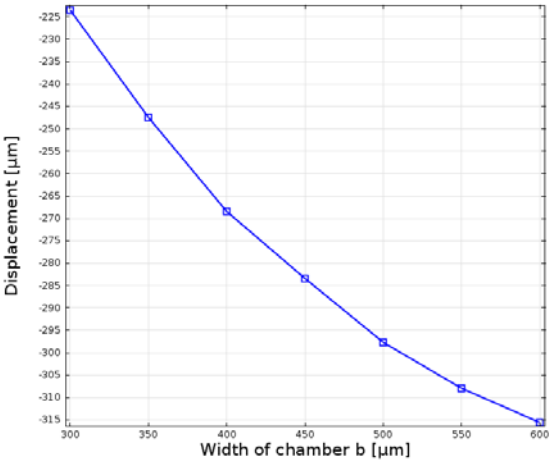


Fig. 4.6 Measurement point of simulation

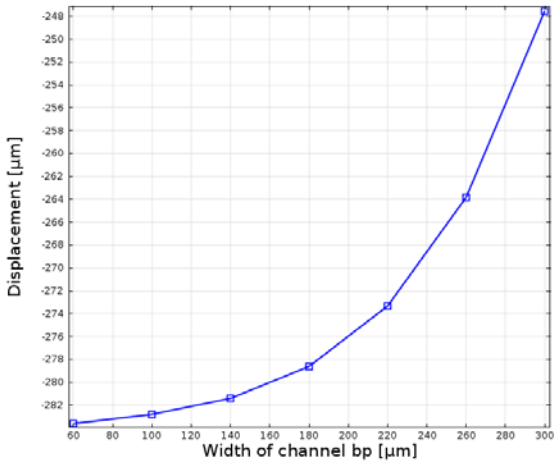
図 4.7 に Case 1 から Case 4 のシミュレーション結果を示す．Case 1～4 では液圧室幅 b の変化が最も変位に影響を与えることがわかった．また,液圧室高さ h = 20 μm において先端変位が極値をとること，液圧室幅 b を増加させることで先端変位が増加すること，液圧室内流路の幅 b_p，高さ h_p を減少させることで先端変位が増加することがわかった．図 4.8 に Case 5 から Case 8 についてのシミュレーション結果を示す．Case 5～8 では，液圧室外壁の厚さ t_h が変位量に最も大きい影響を与えている．これらの結果から，液圧室の外壁の厚さ t_b，t_h，可動部中心部の厚さ t_c を減少させること，また，先端部の厚さ l_t を増加させることによって先端変位を増加させることができることがわかった．



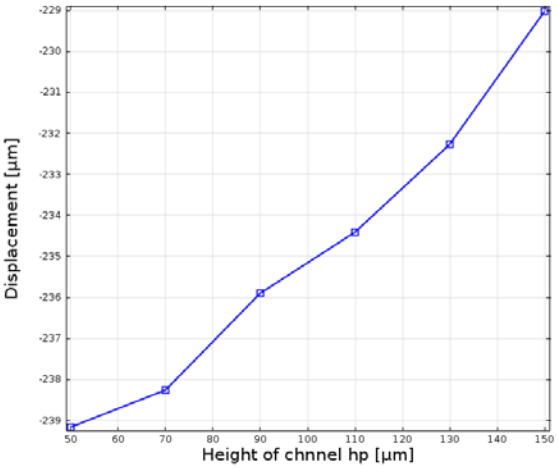
(a) Case 1



(b) Case 2

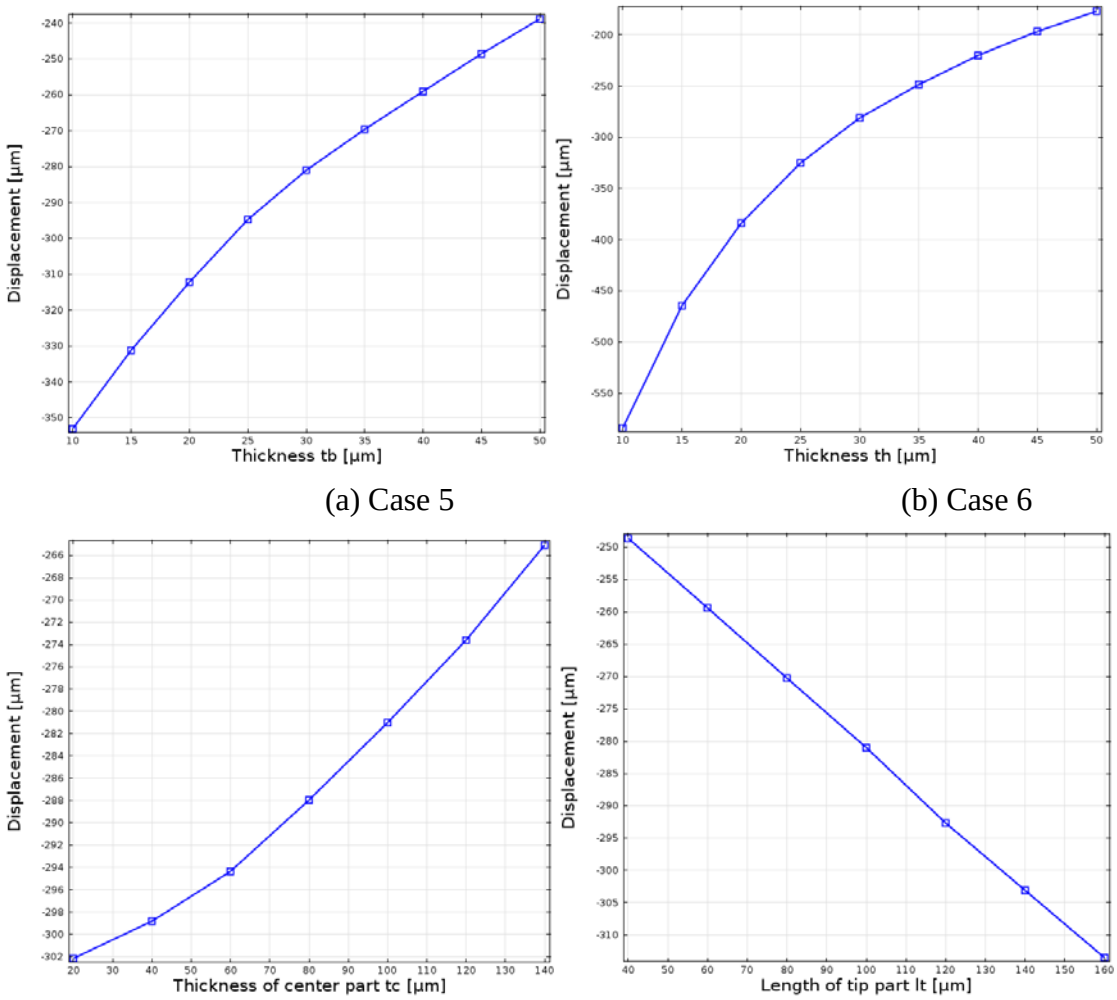


(c) Case 3



(d) Case 4

Fig. 4.7　Simulated displacement for case 1 ~ case 4



(a) Case 5　(b) Case 6

(c) Case 7　(d) Case 8

Fig. 4.8 Simulated displacement for case 5 ~ case 8

目標の屈曲変位量(可動部長さの 30%以上)の達成のために図 4.9 のようにアクチュエータ部の上下面に小さな溝を設けて変位の増大を図る．溝の高さ h_g と幅 l_g の変化に対するアクチュエータ部先端変位を図 4.10 に示す．この結果より，溝を設けることによって変位量を大幅に増加させることが可能であることがわかる．これらの結果を考慮して h_g= 25 μm, l_g= 20 μm と設定する．

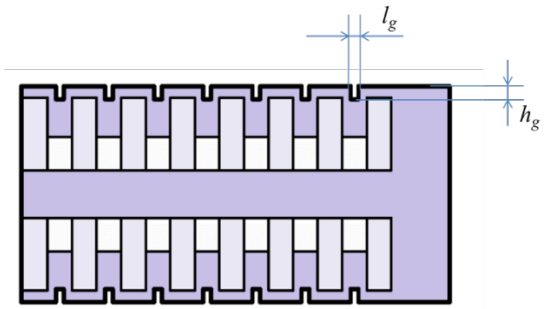
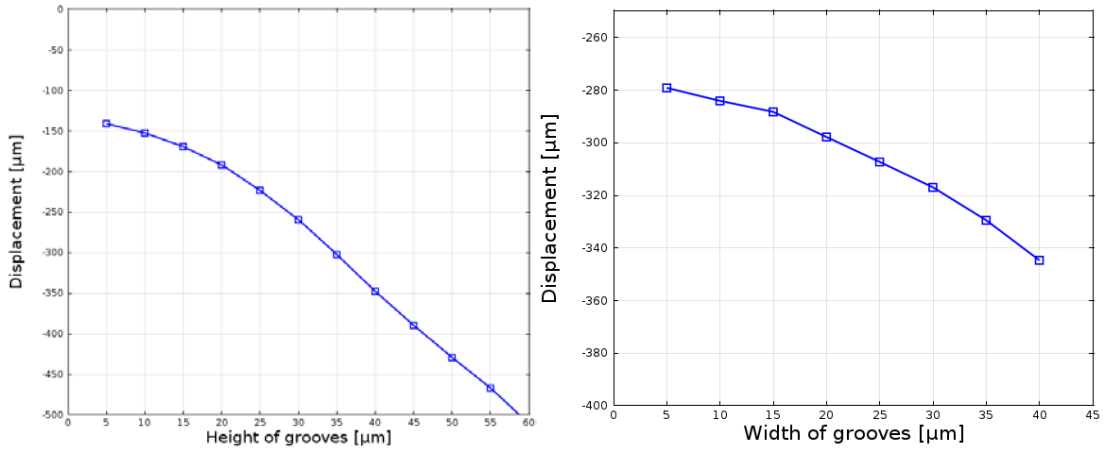


Fig. 4.9 Grooves for large displacement



(a) Parameter h_g　(at l_g = 20 μm)　　(b) Parameter l_g　(at h_g =35 μm)

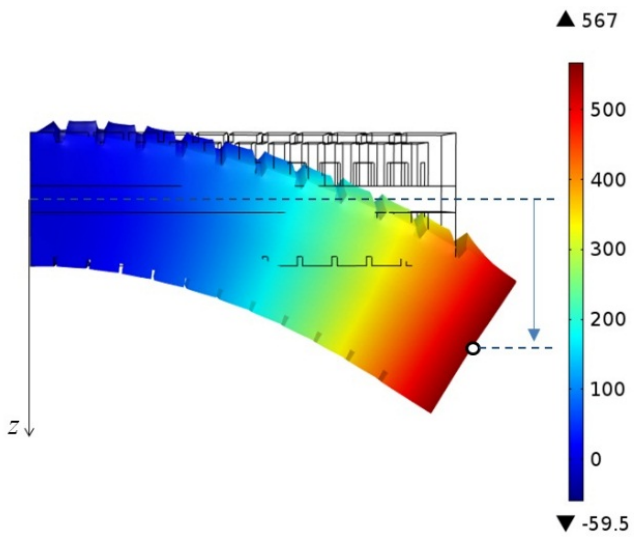
Fig. 4.10 Simulated displacement for h_g and l_g

ここまでのシミュレーションはアクチュエータ固定端から液圧室内壁の先端までの長さを 900μm と固定したモデルを用いていたが，実際に試作する屈曲アクチュエータ部の可動部長さは 1.6 mm と設定される．シミュレーション結果から得られたパラメータ変動に伴う変位出力の相関とソフトリソグラフィ技術によって製作を行う際のアライメント精度の 2 点を考慮して，長さ 1.6 mm の流体屈曲アクチュエータ部の幾何形状を表 4.3 に示すように設定する．

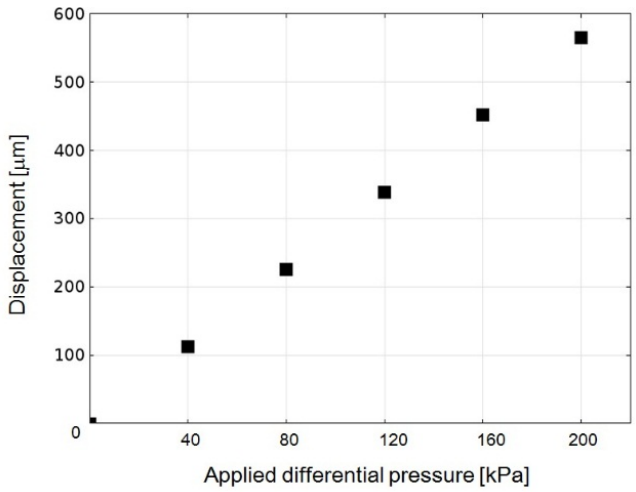
表 4.3 に設定した幾何形状のモデルを用いた FEM シミュレーション結果を図 4.11 に示す．このシミュレーションではヤング率 2.0 MPa，ポアソン比 0.49，密度 1000 kg/m^3 の線形弾性材料と仮定して，上下の液圧室に対して 100kPa のバイアス圧力が印加されているとして解析を行った．解析結果より差圧 200kPa，無負荷の状態で 580 μm の先端変位が得られることが確かめられた．また，差圧 200kPa を印加して先端変位を拘束する条件において，ブロッキング力 1.2mN が発生することも確かめられた．

Table 4.3 Designed parameters for finger part

Parameters	l_p	h	b	b_p	h_p	t_b	t_h	t_c	l_t	n
Value [μm]	68	165	440	150	90	50	35	100	100	13



(a) Bending profile at applied differential pressure of 200 kPa with bias pressure of 100 kPa



(b) Vertical displacement vs. applied differential pressure

Fig. 4.11 Simulation of the PDMS bending actuator part with optimized geometry

4.2.2 液圧屈曲アクチュエータ部の製作プロセス

試作する PDMS 製液圧屈曲アクチュエータ部の概要を図 4.12 に示す．これ以降は，PDMS 製液圧屈曲アクチュエータ部を PDMS アクチュエータ部と呼ぶこととする．高アスペクト比 3D 構造を有する PDMS アクチュエータ部は，ネガティブフォトレジストのマイクロ鋳型によって上部，中央部，下部の 3 個の部分に分けて製作され，後にそれぞれを O_2 プラズマによる表面改質を用いて接合することで各チャンバと流路が形成される．また，PDMS アクチュエータ部の 1 対の液圧室に対して ER マイクロバルブとの流路の接続を行わせるための垂直穴と流路がアクチュエータ部の根元付近に設けられている．本節では，図 4.13 に示すように 8 × 8 × 0.5 mm^3 の基部の一辺に可動部長さ 1.6 mm の PDMS アクチュエータ部を 3 個配置したものを 1 チップとして直径 3 インチ，厚さ 0.6 mm のガラス基板上に PDMS アクチュエータ部を試作する．

新たに提案する PDMS 成形プロセスは，マイクロ鋳型のはく離工程において犠牲層と補助外力の両方を用いることで高アスペクト比 PDMS 構造体が欠損することなく得られることを特徴とする．PDMS アクチュエータ部の製作プロセスを図 4.14 に示す．以下に製作プロセスの各工程の説明を述べる．

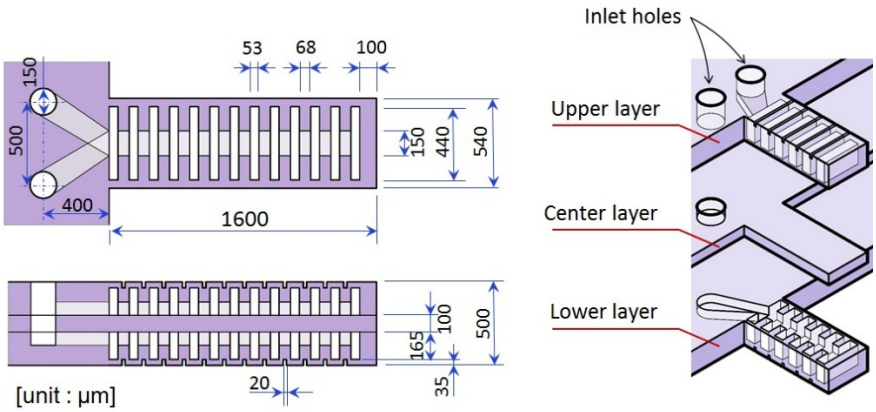


Fig. 4.12 Schematics of a PDMS bending actuator part

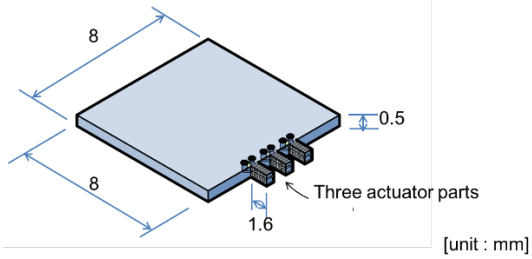


Fig. 4.13 Schematics of designed finger part

(a) 上部，中央部，下部 PDMS 構造体用のネガティブフォトレジスト鋳型をそれぞれ 1 セットずつ基本的なフォトリソグラフィ技術を用いてガラス基板上に製作する．ネガティブフォトレジストとして SU-8 3025 (Microchem Corp.)を用いており，ガラス基板上に所望の高さの SU-8 をスピンコートし露光，現像を行うことによって最大アスペクト比 3 の構造を有するマイクロ鋳型を構築する．各鋳型の製作プロセスを表 4.4 から表 4.7 に示す.

(b) 各鋳型に剥離層としてポリビニルアルコール(polybinyl alcohol, PVA)，フルオロカーボン，ポジティブレジスト(S1805, Shipley Co. LLC)を成膜する．PVA の成膜は上部と下部の雄型と中央部雌型に対して 2wt%の PVA 水溶液を鋳型にスピンコートし，加熱することによって行う [32]．S1805 の成膜は中央部雄型に対してスピンコートを用いて行い，フルオロカーボン膜は上部，下部の雌型に対して CHF_3 ガスを用いた RIE 処理によって 50W, 225 mTorr, 40sccm, 10min の条件で成膜する．

(c) 製作した各鋳型を用いてアライメントを保持しつつ PDMS を加熱硬化させる．使用する PDMS は主剤，硬化剤の重量比を 15:1 に調整した SIM-260（信越化学工業㈱）とし，各鋳型に PDMS を塗布し鋳型を重ね合わせる前に真空処理を 35min 行って鋳型の狭小部へ PDMS を浸透させ，成形時の気泡の発生を防止する．

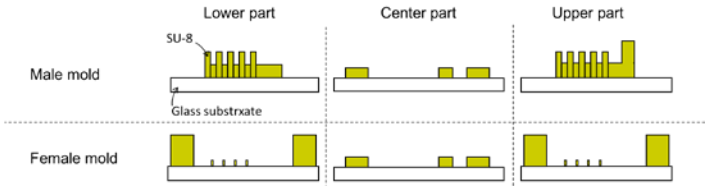
(d) 硬化した PDMS から鋳型を剥離する．PVA は水に溶ける性質を有するため，上部，下部構造体用鋳型においては鋳型を水中に浸漬させた状態における超音波処理によって PVA を溶解させる．この超音波処理に加えて重ね合わせたガラス基板の間に黄銅製の C 形ばねを挿入して基板の面に垂直な力を補助的に加えることで鋳型の剥離が速やかに行われ，PDMS の高アスペクト比構造体が欠損することなく得られる．処理時間は 20min 程度であるが，PDMS 成形時の PDMS の塗布量など他の工程が処理時間に影響する．中央部構造体用鋳型では，成膜した S1805 はアセトンに溶解するが，PVA は溶解しないという性質を用いて S1805 を成膜した鋳型をアセトン浴中で超音波処理と補助外力の印加を行い選択的に剥離させる．

(e) 下部構造体と中央部構造体について，鋳型を剥離して露出した PDMS 面に対して RIE 装置を用いて O_2 プラズマによる表面改質を行う [33]．表面改質し親水化した PDMS 表面同士をアライメントをとりながら密着させることにより PDMS-PDMS 接合を行わせる．接合後に水を用いて超音波処理を行い中央部鋳型の PVA 膜を溶解させて鋳型を剥離する．

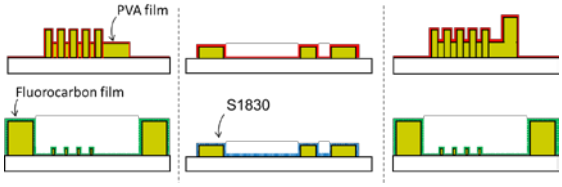
(f) O_2 プラズマを用いた表面改質によって上部構造体と，下部，中央部が接合した

構造体の PDMS-PDMS 接合を行う．PDMS-PDMS 接合を終えた後に，フルオロカーボン膜の PDMS との密着力の低さを利用して鋳型から PDMS アクチュエータ部を取り出す．

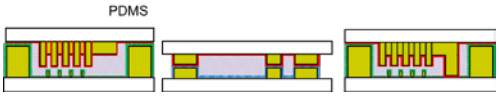
試作した可動部長さ 1.6 mm の PDMS アクチュエータ部を Fig. 4.15 に示す．写真を見ると，PDMS の 3D マイクロ構造体が実現できていることがわかる．



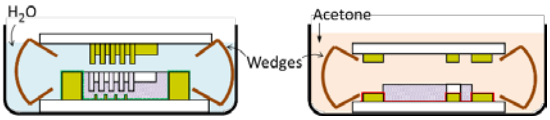
(a) Mold fabrication



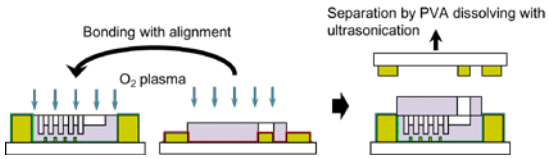
(b) Release layer formation



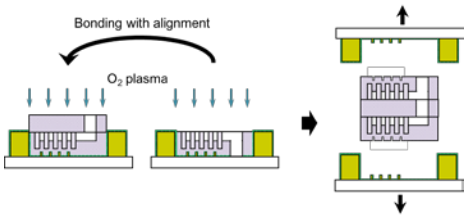
(c) Casting of PDMS



(d) Separation by combination of dissolving of releases layer and ultrasonication

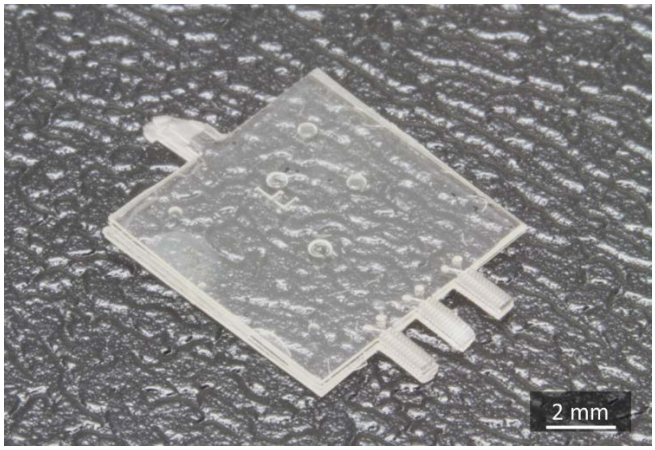


(e) Bonding with O_2 plasma surface activation

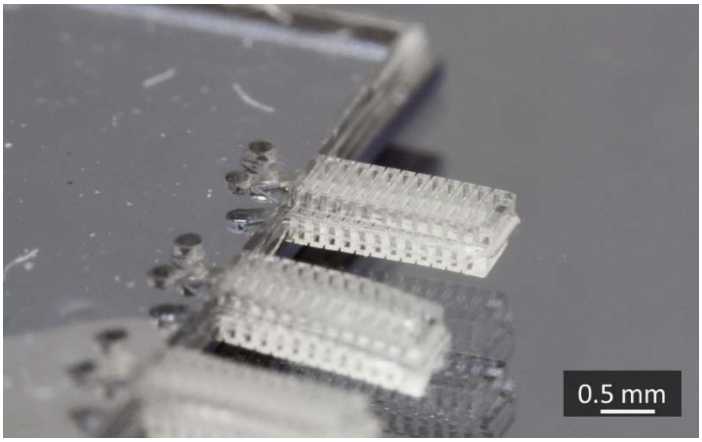


(f) Bonding and final release

Fig. 4.14 Schematics of fabrication process of PDMS actuator part



(a) Over all view



(b) Enlarged view

Fig. 4.15 Fabricated PDMS actuator part

Table 4.4 Fabrication process of male mold of lower part

1	Spin coat	300rpm/10s → 550rpm/10s →1140 rpm/40s
2	Softbake	95℃/10 min →65℃/5 min
3	Exposure	35s
4	PEB	65℃/1 min →95℃/5 min →Room temperture/ 10min
5	Spin coat	300rpm/10s → 550rpm/10s →1300 rpm/40s
6	Softbake	95℃/10 min →65℃/5 min
7	Exposure	55s
8	PEB	65℃/1 min →95℃/5 min
9	Developing	25 min

Table 4.5 Fabrication process of female mold of lower and upper parts

1	Spin coat	300rpm/10s → 550rpm/10s →2900 rpm/40s
2	Softbake	95℃/10 min →65℃/5 min
3	Exposure	35s
4	PEB	65℃/1 min →95℃/3 min →Room temperture/ 10min
5	Spin coat	300rpm/10s → 550rpm/10s →1520 rpm/40s
6	Softbake	95℃/6 min →65℃/3 min →Room temperture/ 10min
7	Spin coat	300rpm/10s → 550rpm/10s →1520 rpm/40s
8	Softbake	95℃/8 min →65℃/4 min
9	Exposure	55s
10	PEB	65℃/1 min →95℃/5 min
11	Developing	30 min

Table 4.6 Fabrication process of male mold of upper part

1	Spin coat	300rpm/10s → 550rpm/10s →1140 rpm/40s
2	Softbake	95℃/10 min →65℃/5 min
3	Exposure	35s
4	PEB	65℃/1 min →95℃/5 min →Room temperture/ 10min
5	Spin coat	300rpm/10s → 550rpm/10s →1300 rpm/40s
6	Softbake	95℃/10 min →65℃/5 min
7	Exposure	55s
8	PEB	65℃/1 min →95℃/5 min →Room temperture/ 10min
9	Spin coat	300rpm/10s → 550rpm/10s →4200 rpm/40s
10	Softbake	95℃/8 min →65℃/3 min
11	Exposure	60s
12	PEB	65℃/1 min →95℃/5 min
13	Developing	30 min

Table 4.7 Fabrication process of male and female mold of center part

1	Spin coat	300rpm/10s → 550rpm/10s →2000 rpm/40s
2	Softbake	95℃/10 min →65℃/5 min
3	Exposure	35s
4	PEB	65℃/1 min →95℃/4 min →Room temperture/ 10min
5	Spin coat	300rpm/10s → 550rpm/10s →2400 rpm/40s
6	Softbake	95℃/8 min →65℃/4 min
7	Exposure	40 s
8	PEB	65℃/1 min →95℃/5 min
9	Developing	15 min

4.3　シリコン ER マイクロバルブの試作

ER マイクロバルブは, 流路断面の寸法をある水準以下(流路高さ 100 μm 以下)に微小化するとその動特性が損なわれていく傾向があり [34]，そのため，ER マイクロバルブの動特性が特に重要となる交流圧力システムにおいては ER マイクロバルブの流路断面寸法の微小化には限界がある．しかし，長方形断面管路の差圧-流量特性の式(2.1)に示すようにシステム全体のマイクロ化にあたって流路断面寸法の微小化が適切に行えないとなると，流量同一の条件においてマイクロバルブで発生可能な弁差圧が小さくなり液圧屈曲アクチュエータ部の駆動が十分に行えない. その対処法としては ER マイクロバルブの流路長さを大きくすることと基底粘度の高い ERF を動作流体として使用するという 2 種類の方法がある．流路を長くすることは本研究の目的であるアクチュエータシステムのマイクロ化に反している．また，提案するアクチュエータシステムでは，ERF が ER 屈曲アクチュエータ内のみに存在し，ERF を搬送する配管が短く基底粘度が高くても粘性圧力損失の影響は小さいため，基底粘度の高い ERF を使用することが求められる．そのため，比較的高粘度のネマティック液晶の特性実験を行うことによって 1 自由度 ER 屈曲アクチュエータの動作流体に用いる ERF の選定を行う.

また，第 3 章では ER マイクロバルブはラージモデルとして NC 加工機によって黄銅を切削加工し手作業で組み立てることによって製作した．しかし液圧屈曲アクチュエータ部と同様に，ER マイクロバルブの機械加工と手作業による製作ではこれ以上のマイクロ化は困難となることから，本章ではシリコンマイクロマシニングを用いた ER マイクロバルブの試作を行い, 圧力伝達部についても同様に試作する.

4.3.1　高粘度 ERF 特性実験

動作原理検証用のラージモデルシステムでは ERF として MLC-6457-000 を用いており，その基底粘度は 23℃でおおよそ 20mPa· s である．MLC-6457-000 よりも基底粘度の高い ERF を本研究のアクチュエータシステムに使用すれば，同じ寸法の流路でも差圧が大きくとれるため，その分流路長さを短くすることが可能となり，マイクロ化に適する．そのため，高粘度の ERF について特性実験を行い静特性と動特性を評価することで, 提案する 1 自由度 ER 屈曲アクチュエータに適する ERF の選定を行う.

高粘度 ERF の静特性実験は第 3 章で説明した ERF 特性実験と同様に行う．動特性実験では PC から高電圧アンプに D/A 変換した入力値を与えることで ER マイクロバルブに対して高電界をステップ状に印加し，一定流量に対する弁差圧変化をバルブ側圧力センサで測定する．バルブ側圧力センサからの出力信号はサンプリング周波数 1000Hz で A/D 変換を行うことにより PC に入力し弁差圧のステップ応答のデータを取得する．ポンプ側圧力センサに長野計器製 KH15（測定レンジ：0~0.5MPa），バルブ側圧力センサに長野計器製 KH15（測定レンジ：-0.1~0.3MPa）を用いた.

ラージモデルで用いていた ERF の MLC-6457-000 に比べて基底粘度が大きい高粘度 ERF として，JNC㈱製のネマティック液晶 JD-5034XX (基底粘度 (20℃):105.6 mPa·s，転移温度:88.8℃)，JD-5036XX (基底粘度 (20℃):103.3 mPa·s，転移温度:113.6 ℃)について特性実験を行った. 実験に用いるシリコン ER マイクロバルブを図 4.16 に示す．ER マイクロバルブの寸法は流路高さ H_{ER} = 164 μm, 流路長さ L_{ER} = 2.0 mm，流路幅 B_{ER} = 1.2 mm である．JD-5034XX の静特性と動特性の実験結果を図 4.17，および図 4.18 に示す．　ER 効果の大きさは 5.9 であり ER アクチュエータとして用いることのできる水準の値であるが, 圧力増加時および圧力減少時の立ち上がり時間が 200 ms, 45 ms となっておりラージモデルに使用していた ERF と比較して立ち上がり時間は 10 倍程度遅くなっており，JD-5034XX の動特性は交流圧力駆動 ER 屈曲アクチュエータには適さない.

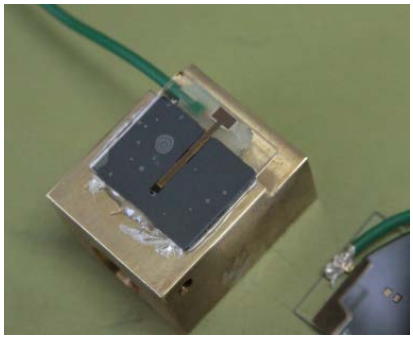


Fig. 4.16 Photocopy of a silicon ER microvalve for characteristic measurement

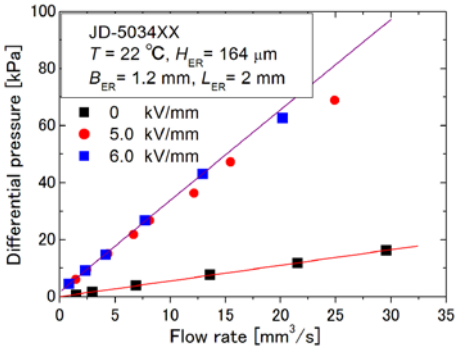


Fig. 4.17 Static characteristic of JD-5034XX

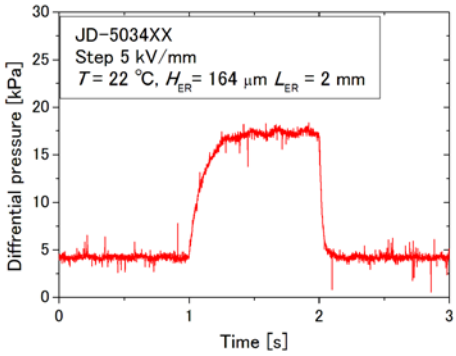
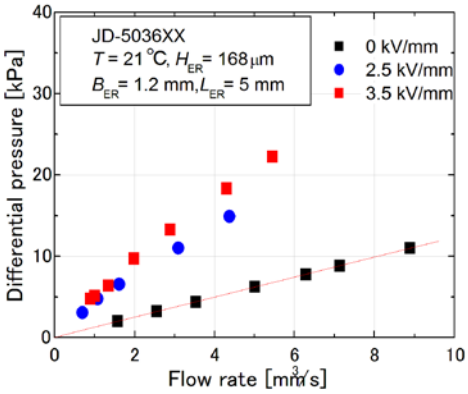
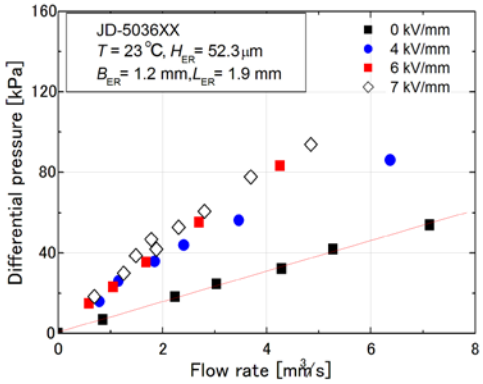


Fig. 4.18 Step response of JD-5034XX

次に JD-5036XX の静特性と動特性について実験を行った．実験には流路高さ H_{ER} = 168 μm，流路長さ L_{ER} = 1.3 mm，流路幅 B_{ER} = 1.2 mm と，流路高さ H_{ER} = 52.3 μm，流路長さ L_{ER} = 1.9 mm，流路幅 B_{ER} = 1.2 mm の 2 種類のシリコン ER マイクロバルブを用いた．JD-5036XX の静特性の実験結果を図 4.19 に示す．実験の結果，H_{ER} = 168 μm において ER 効果の大きさ κ_{ER} = 4，H_{ER} = 52.3 μm において κ_{ER} =3.3 であることが示された．



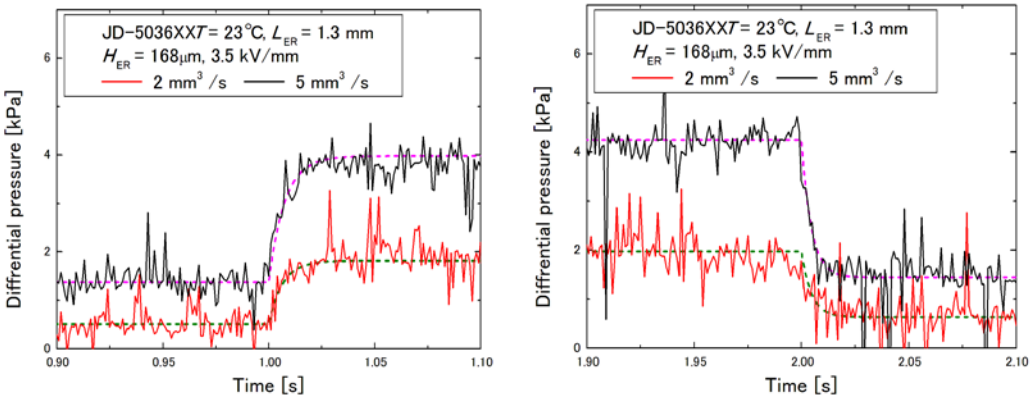
(a) Large height valve



(b) Small height valve

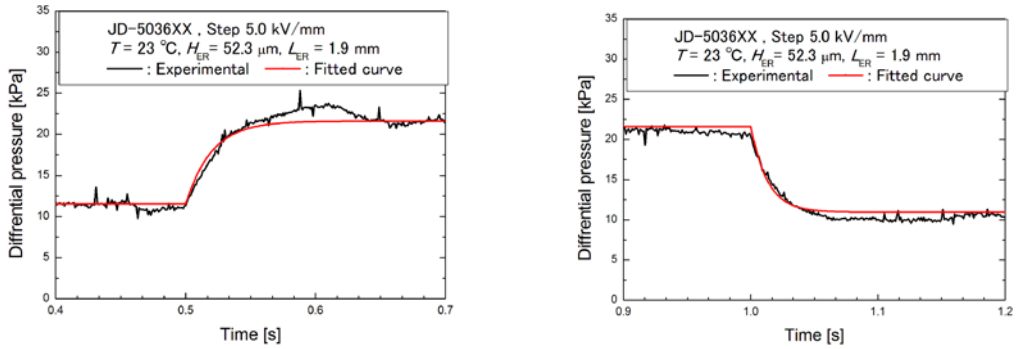
Fig. 4.19 Static characteristic of JD-5036XX

JD-5036XX の動特性の実験には流路高さ H_{ER} = 168 μm，流路長さ L_{ER} = 1.3 mm，流路幅 B_{ER} = 1.2 mm と，流路高さ H_{ER} = 52.3 μm，流路長さ L_{ER} = 1.9 mm，流路幅 B_{ER} = 1.2 mm の 2 種類の ER マイクロバルブを用いた．JD-5036XX の動特性について，H_{ER} = 168 μm の実験結果を 図 4.20 に，H_{ER} = 52.3 μm の実験結果を図 4.21 に示す．H_{ER} = 168 μm においては，立ち上がり時間についてはラージモデルで使用していた ERF(MLC-6457-000，立ち上がり時間 20ms 前後)と比較しても JD-5036XX が優れている．



(a) Step up　　(b) Step down

Fig. 4.20 Step responses of JD-5036XX using ER microvalve with large electrode gap



(a) Step up　　(b) Step down

Fig. 4.21 Step responses of JD-5036XX using ER microvalve with small electrode gap

H_{ER} = 52.3 μm の実験結果では，立ち上がりが 44 ms，立ち下がり時間が 29 ms となり，その両方において H_{ER} = 168 μm の実験結果と比べて遅くなっており，流路高さを低くすることによって応答性が低下することが確認された．

JD-5036XX の静特性と動特性を表 4.8 にまとめて示す．H_{ER} = 52.3 μm の実験結果において応答性, ER 効果の大きさともに H_{ER} = 168 μm のものと比べて減少したが，それでもなお，1 次遅れ応答を仮定して得られるバンド幅は圧力増加時および減少時にそれぞれ 7.9Hz，12Hz となりそれらを平均したバンド幅 10Hz が得られるので, 駆動周波数 10 Hz の交流圧力システムに適用可能である. また, 流路高さの減少で ER 効果の大きさも 4 から 3.3 に減少する結果となったが，交流圧力システムの大幅な性能低下を引き起こすものではないので，本章では JD-5036XX を動作流体として使用する．

Table 4.8 Comparison of two experiments

Height of ER microvalve	Rise time at step-up [ms]	Rise time at step-down [ms]	Magnitude of ER effect
H_{ER} = 52.3 μm	44	29	3.3
H_{ER} = 168 μm	12	14	4

4.3.2 シリコン異方性エッチングによる微細加工

1 自由度 ER 屈曲アクチュエータに搭載するシリコン ER マイクロバルブの設計と試作を行う．シリコン ER マイクロバルブの設計に際して PDMS アクチュエータ部の屈曲変形に必要な流量を求めるために，アクチュエータ部の液圧チャンバの体積膨張量について概算を行う．4.3.2 項で製作した PDMS アクチュエータ部の液圧室容積は，補強壁の存在でおおよそ 1/2 になるので 0.17 mm×0.44 mm×1.5 mm /2 =0.056 mm^3 である．シリコン ER マイクロバルブの動作流体に JD-5036XX を使用し, 流路高さ H_{ER} = 45 μm, 流路長さ L_{ER} = 2.0 mm, 流路幅 B_{ER} = 100 μm とすることにより，0.1MPa の弁差圧が加わっているときに発生する流量は 0.083 mm^3/s となり，PDMS アクチュエータ部の容積の概算値と比べて十分な流量となることがわかる．

ER マイクロバルブはシリコン流路部と電極部から構成される．シリコン流路部は TMAH(Tetramethyl ammonium hydroxide)を用いたシリコン異方性ウェットエッチングにより製作される．シリコンへの流路形成は図 4.22 に示す手順で行う．

(a) 3 インチシリコンウエハ(厚さ 200μm, 両面に 1 μm 厚の SiO_2 膜)上にポジティブフォトレジスト OFPR800LB を用いてパターニングする．

(b) OFPR800LB をマスクとして RIE によって SiO_2 のエッチングを行い(CF_4 20sccm, 100 W, 10mTorr)，その後にレジストの除去を行う(O_2 10 sccm, 100 W, 100mTorr).

(c) SiO_2 をマスクとしてシリコンエッチャント(25% TMAH, 日本化成工業株式会社)でエッチングを行う(70 ℃).

(d) (a)から(c)を繰り返してアライメントホール，穴，ダイアフラム，溝を形成する．

試作したウエハを図 4.23 に示す．図 4.23 のダイアフラム(直径 6 mm，厚さ 24 μm)は 1 自由度 ER 屈曲アクチュエータの圧力伝達部として用いており, FEM シミュレーションによって，振幅 180kPa の交流圧力印加時に圧力伝達部における圧力損失が 1kPa 以下であり無視できるほどに小さいことがわかっている．

なお，今回のシリコン異方性エッチングでは，シリコンのウェットエッチン

グ中に生じるアンダーカットを減少させるために，シリコンエッチャント TMAH に界面活性剤(Polyoxyethylene(10) Octylphenyl Ether，和光純薬株式会社)を 0.1 vol%添加している [35]. 今回の条件においてエッチングレートは 0.3 μm/min となった.

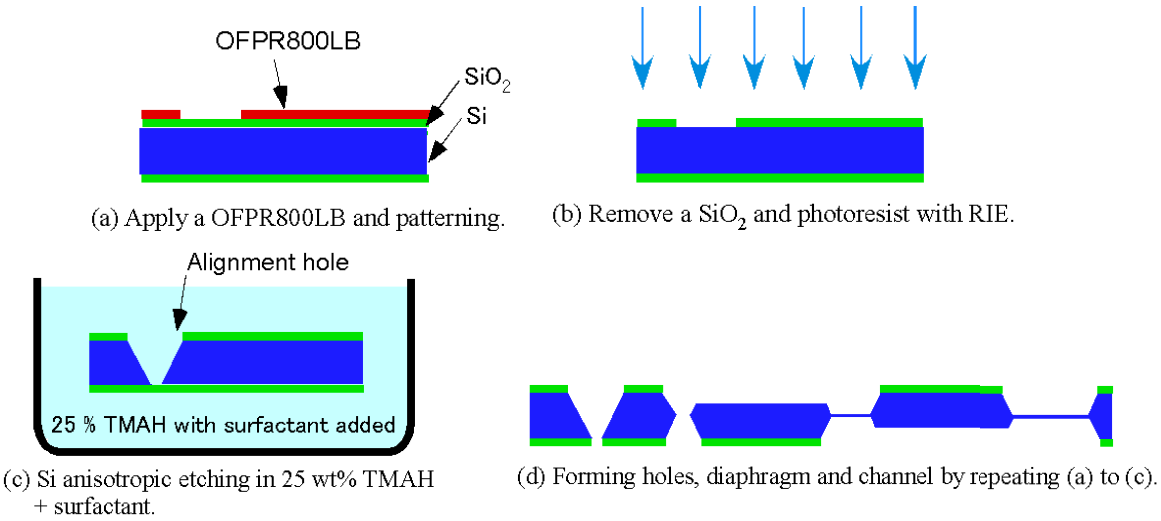


Fig. 4.22 Process of anisotropic silicon etching

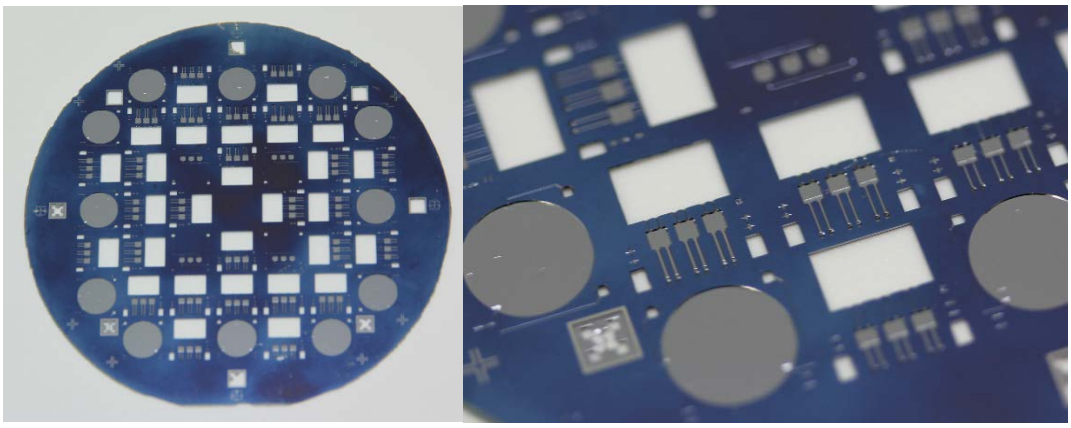
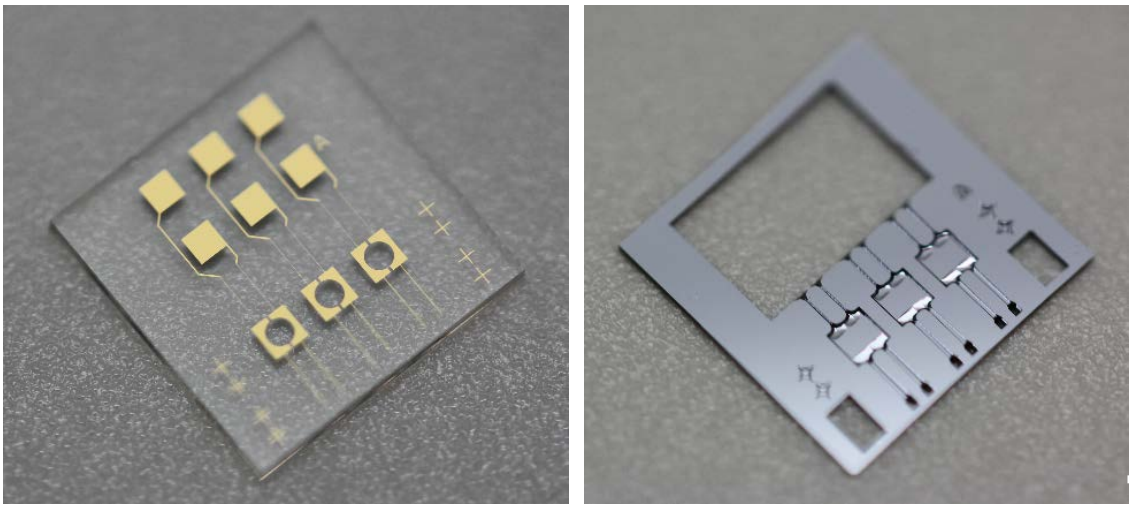


Fig. 4.23 Fabricated silicon microchannels, holes and diaphragms

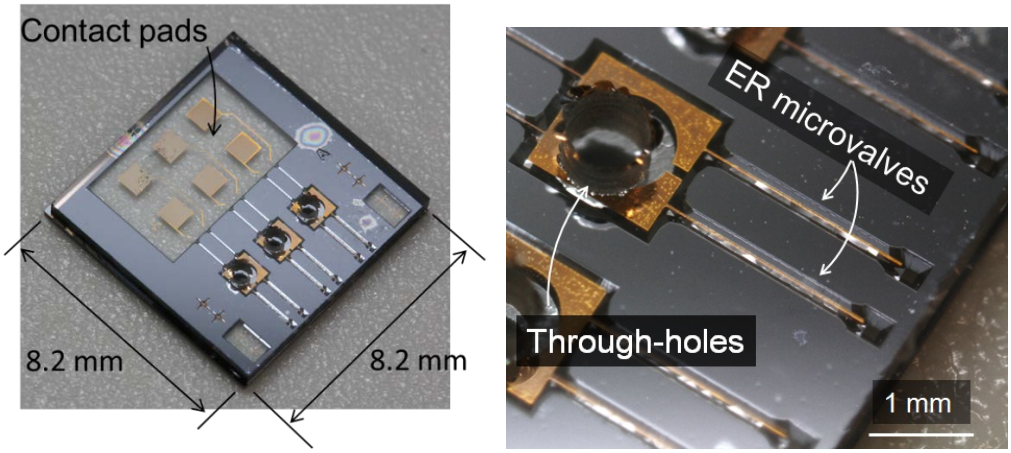
電極部はパイレックスガラスウエハ上に Cr および Au を蒸着させた後にパターニングをして製作した．製作した Si 流路部と電極部をダイシングしたものを図 4.24 に示す．また，電極部のガラス基板に ERF 供給のためのϕ620μm の貫通穴を形成した．さらに，ダイシングした流路部と電極部をアライメントして重ね合わせ陽極接合を行い製作した ER マイクロバルブを図 4.25 に示す．シリコン流路部と電極をパターニングしたパイレックスガラスをホットプレート上で 540℃，20 min 加熱した後にシリコン流路部を正極，パイレックスガラスを負極

として 500V の電圧印加によって陽極接合を行った．製作した ER マイクロバルブは流路高さ H_{ER} = 47 μm，流路長さ L_{ER} = 2 mm，流路幅 B_{ER} = 0.1 mm となっており，実際の流路高さと設計値との間に差があるが，特性実験を行うには問題無いと思われる．また図 4.25 (a)に示すように，ER マイクロバルブにおいて一部陽極接合が行えていない箇所が存在するが，これはガラスの穴あけを行ったときのガラス粉の残渣が完全には除去できていなかったことによるものと考えられる．また，電極部の穴の位置がずれているが，これは穴あけのときに用いたジグの製作誤差によるものと考えられ，ジグの各部寸法の測定を正確に行うことで改善が見込める．



(a) Electrode part　　(b) Flow channel part

Fig. 4.24 Diced electrode part and Si flow channel part



(a)　Over all view　　(b) Enlarged view of microvalve part

Fig. 4.25 Fabricated ER microvalves

4.4　1 自由度 ER 屈曲アクチュエータ

4.4.1　1 自由度 ER 屈曲アクチュエータの構築

1 自由度 ER 屈曲アクチュエータは図 4.26 の概要に示すように，4.3 節で試作した PDMS アクチュエータ部, ER マイクロバルブなどのマイクロ流体部品を組み立てることによって構築される．各流体部品同士を組み立てる際には各部品間の流体接続が確実に行われることが重要であり，例えば接着剤によってマイクロ流路が閉塞するような事態は避ける必要がある．陽極接合や表面改質を用いた PDMS-SiO_2 接合などはドライな接合手法でありマイクロ流体部品同士の組み立てには適している．そのため，1 自由度 ER 屈曲アクチュエータの組み立てを陽極接合と PDMS-SiO_2 接合によって行う．

圧力伝達部のシリコンダイアフラムと ER マイクロバルブの陽極接合は, それらを重ね合わせてホットプレート上で 540℃，20min 加熱した後にシリコンダイアフラム側を正極，ER マイクロバルブの電極付きガラス側を負極に接続して 500V を電圧印加して行われる．この陽極接合によって図 4.27 のように圧力伝達部の ER マイクロバルブ上への取り付けと ERF 充填用の流路の形成がなされた．

圧力伝達部を陽極接合して取り付けた ER マイクロバルブと PDMS アクチュエータ部との接合には表面改質による PDMS-SiO_2 接合 [36] を用いた．CVD(Chemical Vapor Deposition)によって ER マイクロバルブの接合面に SiO_2 膜を形成し, ER マイクロバルブと PDMS アクチュエータ部のそれぞれの接合面に O_2 プラズマ処理を行って表面改質した後に，図 4.28 に示すようにアライナを用いて ER マイクロバルブの流出穴と PDMS アクチュエータ部の流入穴とのアライメントをとりながら両者を密着させることにより PDMS-SiO_2 接合を形成する．

製作した 1 自由度 ER 屈曲アクチュエータを図 4.29 に示す．図 4.29(b)に示されるように, 4.3 節で提案した PDMS 成形プロセスによって高アスペクト比構造のチャンバ内の補強壁や上下面に設けた微細な溝を有する PDMS アクチュエータ部が実現されている．

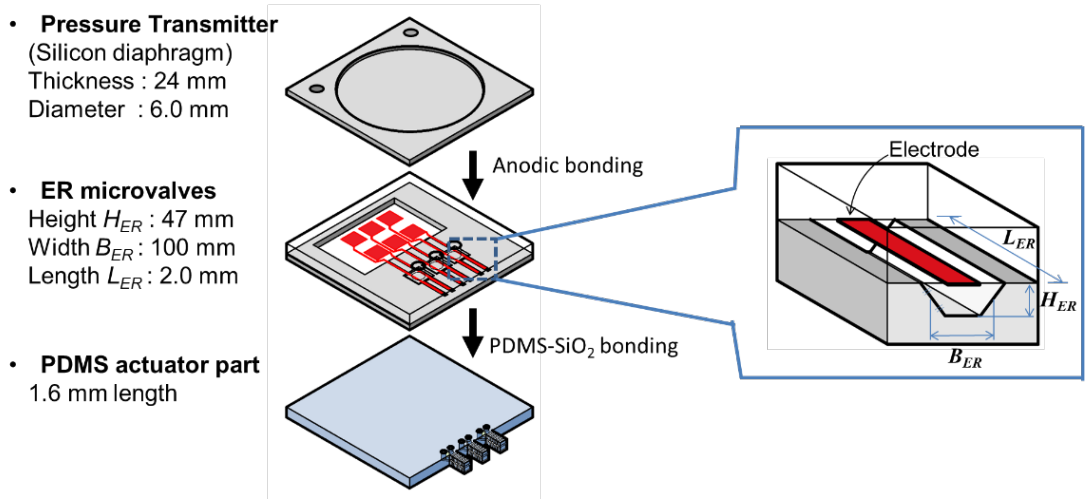
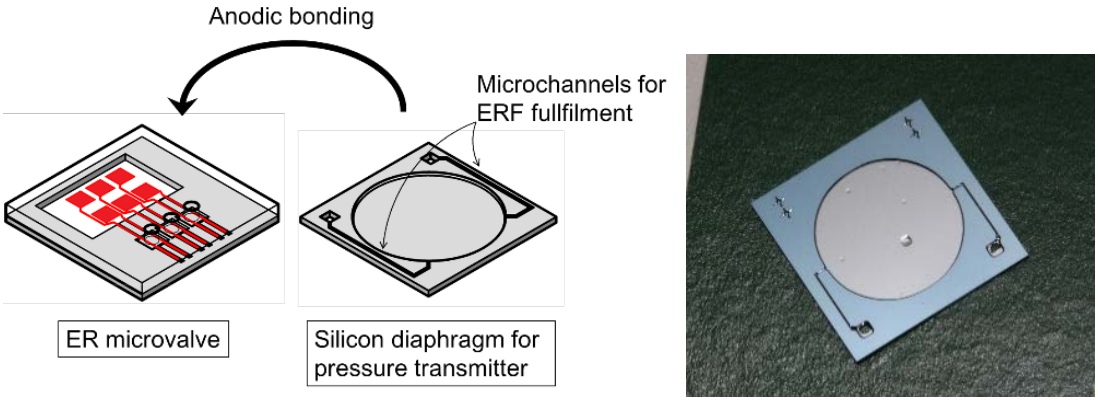


Fig. 4.26 Dimensions of fabricated 1DOF ER bending actuators



(a) Schematic of bonding　(b) Photocopy of pressure transmitter

Fig. 4.27 Anodic bonding between ER microvalve and pressure transmitter

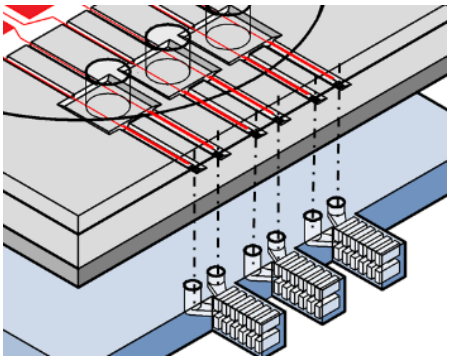
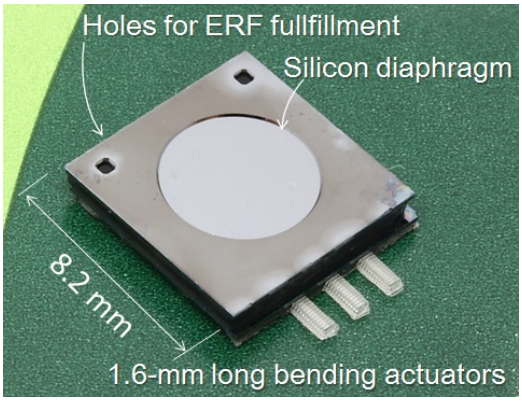
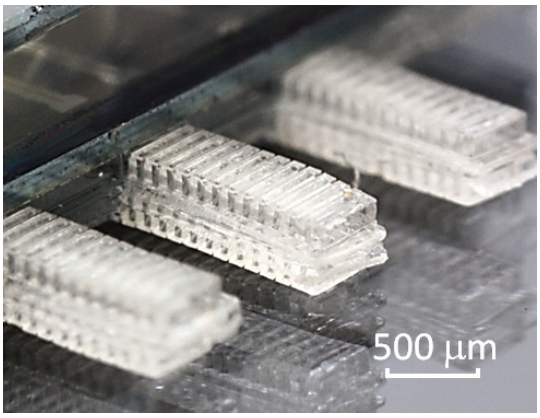


Fig. 4.28 PDMS-SiO_2 bonding using O_2 plasma treatment



(a) Over all view



(b) Enlarged view of finger part

Fig. 4.29 Fabricated MEMS based ER microfinger

4.4.2　1 自由度 ER 屈曲アクチュエータの特性実験

図 4.30 は 1 自由度 ER 屈曲アクチュエータの特性実験の概略図である．本実験では交流圧力源として第 3 章で試作したラージモデルを使用し，ER バルブへの電圧印加は高電圧アンプを用いる．また，交流圧力源ラージモデルと高電圧アンプは PC の駆動プログラムによって制御され，駆動周波数 15 Hz の正弦波圧力と方形波電圧がそれぞれ出力される．交流圧力は圧力センサで測定し，アクチュエータの動作はその側面からカメラで撮影した動画を解析することによってその先端変位の大きさと時間応答について測定する．また本特性実験では交流圧力源から供給される交流圧力と ER バルブへの印加電圧は手動操作で補正する．

実験の前準備として ER 屈曲アクチュエータシステム内に動作流体を充填し気泡を残さないようにするために装置全体の真空引きを行う．また，1 自由度 ER 屈曲アクチュエータと交流圧力源との流体接続には内径 2.5 mm, 外径 4 mm, 長さ約 600 mm のナイロンチューブを用いる．動作流体の ERF は低分子ネマティック液晶 JD-5036XX を用いることとし，交流圧力源からの供給圧力を測定す

る圧力センサには長野計器製 KH15 (測定レンジ : 0~1MPa)を使用する．1 自由度 ER 屈曲アクチュエータの固定には専用のアルミ合金製のマニホールドを用いる．実験の様子を図 4.31 に示す．なお，特性実験は室温 22℃，湿度 60%の環境で行った．

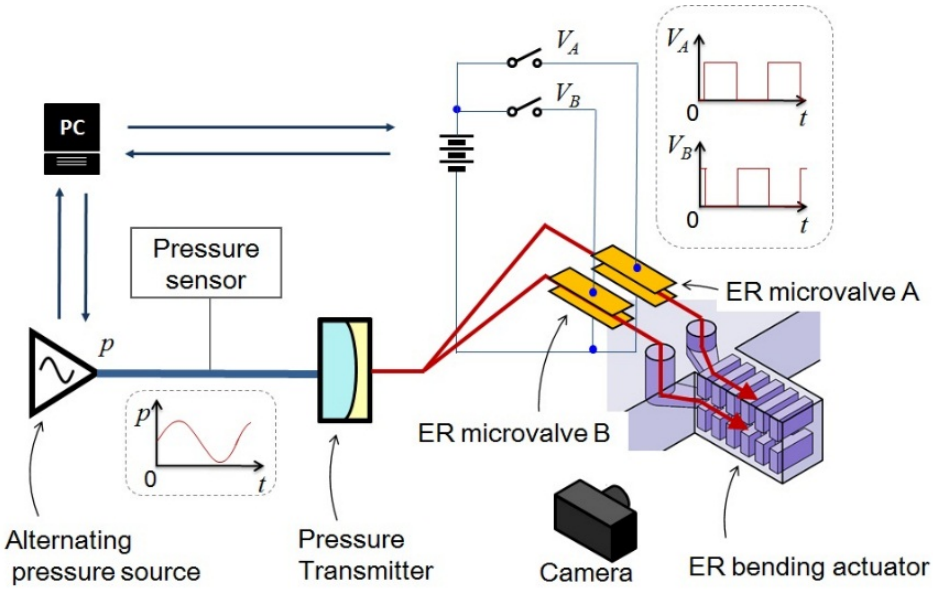


Fig. 4.30 Experimental apparatus for characterization of ER bending actuator

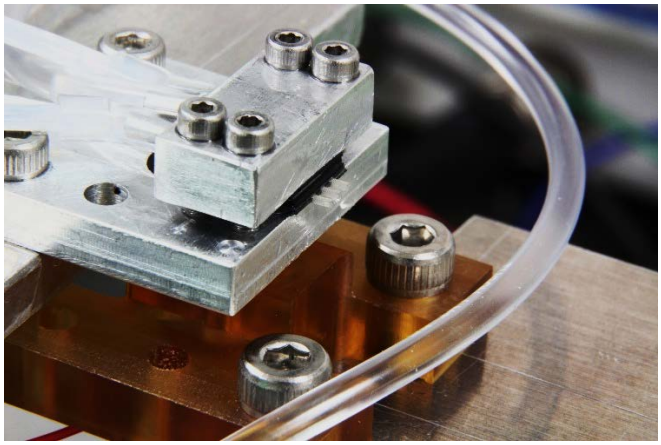
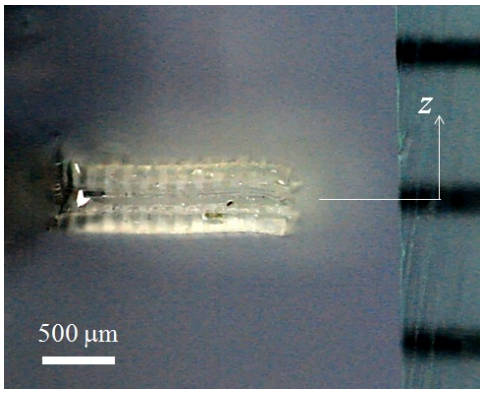
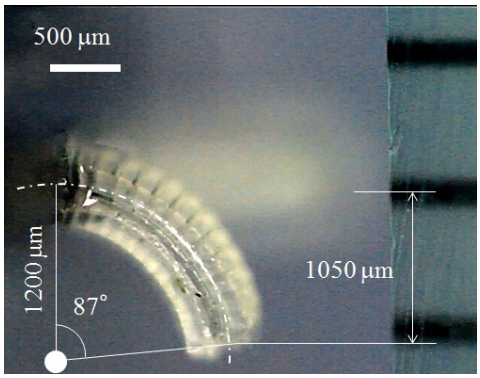


Fig. 4.31 Photocopy of 1DOF actuator fixed on aluminum base using manifold

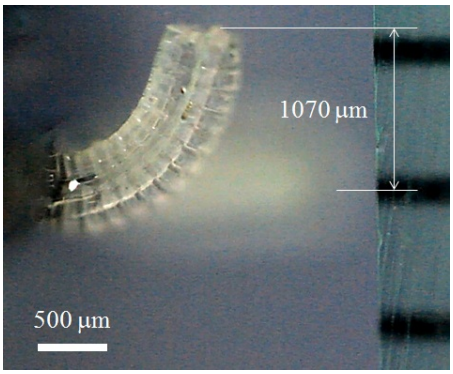
交流圧力源から供給される振幅 160 kPa の正弦波圧力と ER マイクロバルブへの振幅 175V の方形波電圧を同期させて 1 自由度 ER 屈曲アクチュエータシステムを動作させた結果，図 4.32 に示すように両方向屈曲動作が出力された．供給圧力と印加電圧の時間変化を図 4.33 に示す．この実験によって，上下にそれぞれ 1070 μm と 1050 μm の垂直変位と屈曲角度 87°(曲率半径 1.2mm) が達成された．



(a) Initial position



(b) Downward motion



(c) Upward motion

Fig. 4.32　Experimental setting of ER microfinger

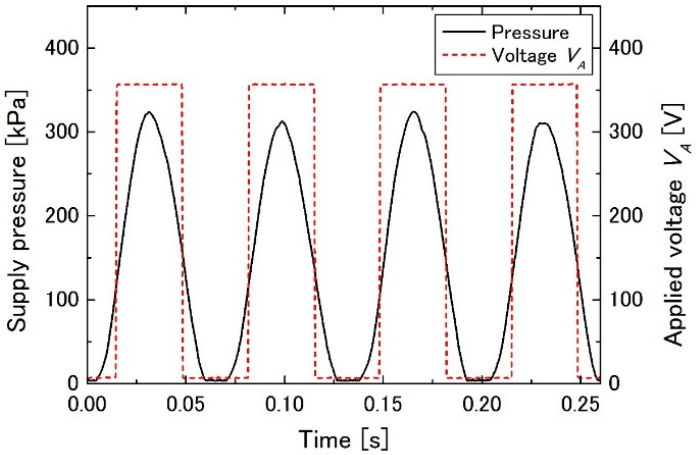


Fig. 4.33 Supply pressure and applied voltage to the ER microvalve A

次に，ER 屈曲アクチュエータの静的変位と ER マイクロバルブへの印加電圧の関係性を求めるために静特性実験を行った．交流圧力振幅 90 kPa と 160 kPa においてバルブへの印加電圧を変化させたときの先端中央部変位の測定結果を

図 4.34 に示す．それぞれの圧力振幅の曲線において，印加電圧 50V において変位が発生し始め，また 250V と 350V において変位がそれぞれ飽和している．これらの変位特性は ER マイクロバルブの特性と関連付けて説明することができる．同一弁差圧の条件において，印加電圧が低い状況では ERF の見かけの粘度変化はほぼ 0 となり，印加電圧が大きくなるにつれて粘度変化も大きくなり最終的には粘度変化は飽和する．また，弁差圧が大きくなると粘度変化が飽和する電圧値も大きくなる．それゆえに ER 屈曲アクチュエータの変位と印加電圧は単純な比例関係とならず，屈曲動作によって出力された変位であることも変位-印加電圧曲線の非線形性を高めている．

さらに動特性についても実験を行った．振幅 160 kPa の正弦波圧力と振幅 175V の方形波電圧を実験開始から 1s の時点で印加したときの 1 自由度 ER 屈曲アクチュエータの変位の立ち上がりにおけるステップ応答を図 4.35 に示す．このステップ応答から上下方向それぞれへの屈曲変位の立ち上がり時間が 1.1 s となることが確認された．

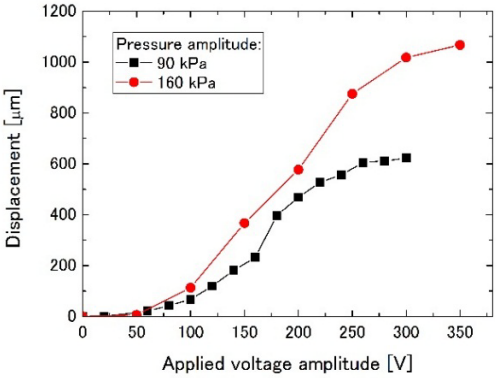


Fig. 4.34 Static tip displacement vs. voltage

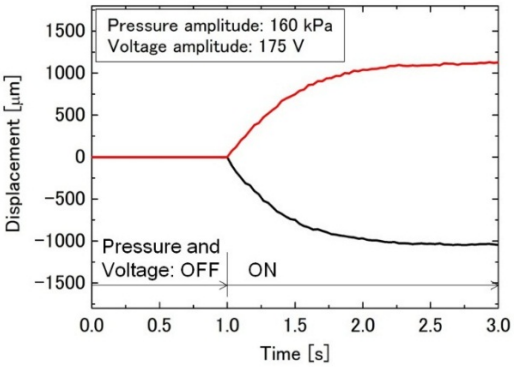


Fig. 4.35 Step-up responses of the actuator

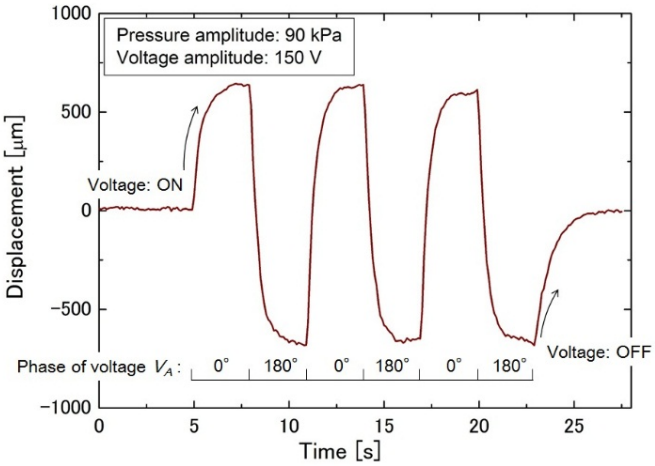


Fig. 4.36 Step responses when switching the bending direction by phase inversion

また，交流圧力振幅 90kPa，電圧振幅 150V の条件で上下方向に複数回屈曲動作をスイッチングしたときのステップ応答について図 4.36 に示す．開始時点から 5s までの間は 2 個の ER マイクロバルブに同位相の電圧を印加しつつ交流圧力を供給しており, 5s 以降は交流圧力を供給しつつ 2 個の ER マイクロバルブに対して位相差 180°の電圧を 3s 周期で 6 回スイッチングして上下方向に駆動させており, 23 s の時点で ER マイクロバルブへの電圧印加を停止させてアクチュエータの変位も停止させた．変位 0 から上側に駆動させたときのステップ応答における立ち上がり時間は 1.1s，全振幅で駆動させたときの立ち上がり時間は 0.9s となった．1 自由度 ER 屈曲アクチュエータシステムを一次遅れ系と仮定すれば，ステップ応答の結果から試作した ER 屈曲アクチュエータのバンド幅が 0.4Hz となることが確認された．なお，駆動中の PDMS アクチュエータ部には，交流圧力に起因する振動（最大で数 10 μm 程度）が副次的に発生していた．将来的に屈曲アクチュエータの位置決め制御を行う際，この振動は位置決め精度に影響してくるが，ER マイクロバルブの流路抵抗の調整や駆動周波数の高周波化を行うことによって，振動の大きさを低減させることは可能である．一方，この交流圧力起因の微小振動は ER 屈曲アクチュエータでマイクロマニピュレーションを行わせる際にはアクチュエータと対象物間の凝着力を低減させる効果が現れる可能性もあるため，その際はこの微小振動が有利に働くことも考えられる．

特性実験における最大の屈曲変位は 1070 μm でありアクチュエータ長さ 1600 μm の 70%に相当する値となる．また，屈曲動作のバンド幅は 0.4Hz となったが，ER アクチュエータの応答性は ER マイクロバルブの流路寸法を調整することにより容易に改善できる．例えば，ER アクチュエータに搭載する ER マイクロバルブの流路高さを本章で用いた 47 μm から 168 μm に変更すれば，4.3.1 項の実験結果から示されるように，ER マイクロバルブの立ち上がり時間は圧力上昇時に 12 ms，圧力下降時に 14 ms となりバンド幅 27 Hz まで向上することがわかっている．また，本アクチュエータの動作流体として用いた低分子ネマティック液晶 JD-5036XX と比較して, 外部からの電界刺激に対してより高速な応答性を有する ERF を探索して動作流体として用いることも考えられる．これらの実験結果から，本章で提案する 1 自由度 ER 屈曲アクチュエータは高速な大変位動作を出力可能であることが示された.

4.5　結言

第 3 章で動作原理の検証を行った交流圧力駆動 ER 屈曲アクチュエータシステムのマイクロサイズでの実現のために，MEMS 技術を用いた 1 自由度 ER 屈曲アクチュエータの試作を行った.

MEMS 微細加工によるマイクロ化に適合しつつ高性能な屈曲形流体アクチュ

エータの実現のために，高アスペクト比構造を有する PDMS アクチュエータ部が FEM 解析に基づいて設計した．また，PDMS の高アスペクト比 3 次元構造を実現するために新たな PDMS 成形プロセスを開発し，可動部長 1.6 mm の PDMS アクチュエータ部を試作した．

ER マイクロバルブのマイクロ化のために高粘度 ERF の選定を行い，低分子ネマティック液晶 JD-5036XX を採用した．ER マイクロバルブはシリコン異方性エッチングで微細加工されたシリコン流路部と電極付きガラスを陽極接合することにより試作した．

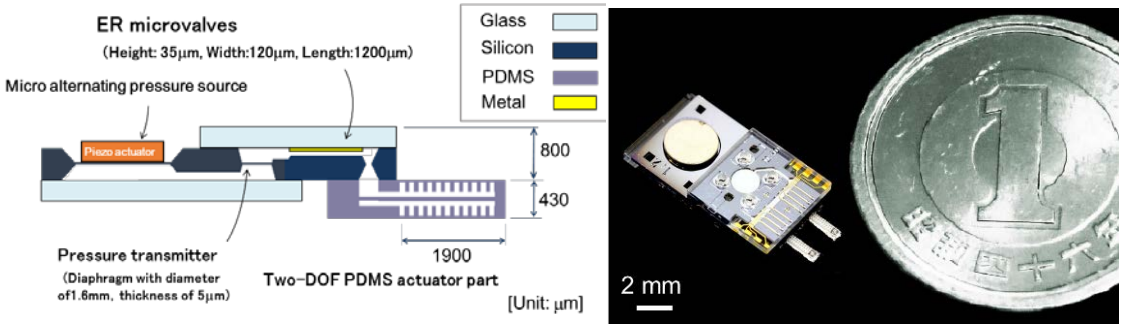
1 自由度 ER 屈曲アクチュエータが陽極接合と表面改質を用いて組み立て，静特性と動特性について実験を行うことで，上下両方向への 1.1mm の屈曲変位，87°に至る屈曲角度(曲率半径:1.2 mm) が立ち上がり時間 1.1s を達成し，マイクロロボットへの応用可能性を示した．

第 5 章　2 自由度 ER 屈曲アクチュエータシステム

5.1　緒言

本章では，交流圧力源を含めたシステム全体のマイクロ化および多自由度アクチュエータシステムの構築のために，圧電アクチュエータを駆動源とする交流圧力駆動 2 自由度 ER 屈曲アクチュエータシステムの実現を目的とする．交流圧力駆動 ER 屈曲アクチュエータシステムの概略図と実験デバイスの写真を図 5.1 に示す．第 4 章で開発された PDMS 成形プロセスを用いて可動部長さ 1.9mm の 2 自由度 PDMS 屈曲アクチュエータ部を試作し，空気圧試験によりその 2 自由度動作を確認する．製作の再現性向上のために PDMS 成形プロセスの一部を変更し，変更したプロセスによる 2 自由度 PDMS アクチュエータ部についても試作する．また，交流圧力源と ER マイクロバルブを 1 チップ上に搭載したマイクロ流体チップを試作し，そのマイクロ交流圧力源の特性を検証する．また，2 自由度 PDMS アクチュエータ部と ER マイクロバルブとマイクロ交流圧力源を搭載するマイクロ流体チップを用いて 2 自由度 ER 屈曲アクチュエータシステムを構築し，ERF を作動流体とした駆動実験を行う．

なお，試作する 2 自由度 ER 屈曲アクチュエータシステムは，特性評価のための実験用デバイスである．2 自由度屈曲動作を実現するとともに，マイクロ交流圧力源を搭載して 1 チップ上にシステムを構築し，その妥当性を実験的に検証する．そのため，交流圧力源とアクチュエータ部の位置が隣接しており液圧配管部の占有スペースも小さいが，動作流体を水と ERF の 2 種類とし，圧力伝達部におけるパワー損失についても検討できるようにした．実際の多自由度システムの場合では，圧力源と複数のアクチュエータ部の位置を離して配置する必要のある場合も多く，交流圧力駆動多自由度 ER マイクロアクチュエータシステムを適用する小形アプリケーションにとって，提案するシステムの特長であるマイクロ化とパワー損失の低減が非常に有効となることをあらためて指摘しておく．



(a) Schematic　　(b) Photocopy of experimental device

Fig. 5.1 2DOF ER bending actuator system driven by alternating pressure

5.2　2 自由度 PDMS アクチュエータ部

5.2.1 設計と試作

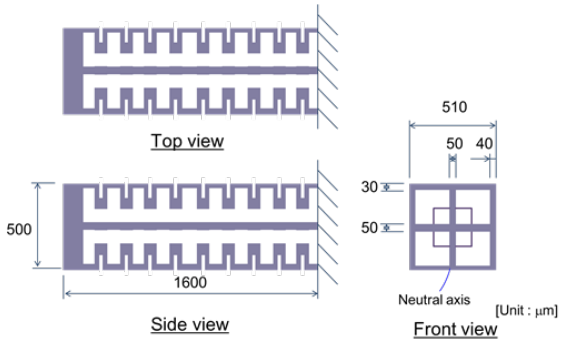
これまでの研究では上下方向に屈曲する 1 自由度の液圧屈曲アクチュエータについて試作, 実験を行ってきたが, マイクログリッパやマイクロロボットなど多自由度なシステムを構築するためには多自由度を有するアクチュエータが望ましい．そこで，本節では 2 自由度方向に屈曲変形を行う液圧屈曲アクチュエータ部として，PDMS をその構造材として用いた 2 自由度 PDMS アクチュエータ部を提案し，設計，製作を行い，その 2 自由度動作を空気圧実験により確認する．

提案する 2 自由度ソフトアクチュエータは, 図 5.2 のように長さ方向に対し平行に並んだ 4 個の液圧室を一体にしたもので，それぞれの液圧室内に補強壁を有する構造となっている．各液圧室に印加する圧力を制御することで 2 自由度方向に屈曲変形が発生する．また, 補強壁はアクチュエータの径方向への膨張を抑制するために設けられており，アクチュエータの屈曲変位の拡大と応答性向上の効果がある．本アクチュエータは第 4 章で提案した PDMS のマイクロモールディング技術を用いて製作する．この製作プロセスでは, 主剤と硬化剤の混合比を 15:1 にして混合した PDMS（SIM-260, 信越化学工業株式会社）を用いて, ガラス基板上のネガティブフォトレジスト鋳型によって成形した PDMS 製の部品を O_2 プラズマによる表面処理によって接合し，組み立てることにより 2 自由度動作が可能な液圧屈曲アクチュエータ部を構築する．

提案する 2 自由度 PDMS アクチュエータ部は第 4 章で提案した 1 自由度変位を出力する PDMS アクチュエータ部の中央に縦壁を追加して，液圧チャンバを 2 個から 4 個に増やした形状となっている．1 自由度 PDMS アクチュエータ部は圧力印加の下，その長さに対し十分な大きさの屈曲変位を出力することができたが, 2 自由度アクチュエータ部における追加の縦壁の存在は屈曲動作を阻害するため，新たに提案する 2 自由度 PDMS アクチュエータ部の 2 自由度動作について COMSOL 5.1 の超弾性モジュールを用いて FEM シミュレーションを行い, 1 自由度アクチュエータとの比較解析を行う．1 自由度と 2 自由度それぞれの PDMS アクチュエータ部についてその幾何形状を図 5.2, 図 5.3 にそれぞれ示す．

それぞれの液圧室に対して 160kPa の差圧と 80kPa のバイアス圧力を与えたときのシミュレーション結果を図 5.4 に示す．シミュレーション上で各液圧室への印加圧力を変化させることで 2 自由度動作が出力されることを確認した．また, 1 自由度アクチュエータの垂直方向への最大変位は 610μm となっていることに対し，2 自由度アクチュエータの最大変位は 641μm(垂直方向)，587 μm(垂直方向)，480 μm(斜め方向)となった．2 自由度 PDMS アクチュエータ部の垂直方向,

水平方向の変位は 1 自由度のものと同程度となったが，斜め方向の変位は比較的小さくなっている．これは，垂直方向，水平方向への変形では上側と下側の 2 個ずつの圧力室を用いて屈曲変形を発生させるが，斜め方向への変形では上側と下側に対角に配置されている液圧室 1 個ずつしか PDMS アクチュエータ部の変形に寄与しないことに起因する．



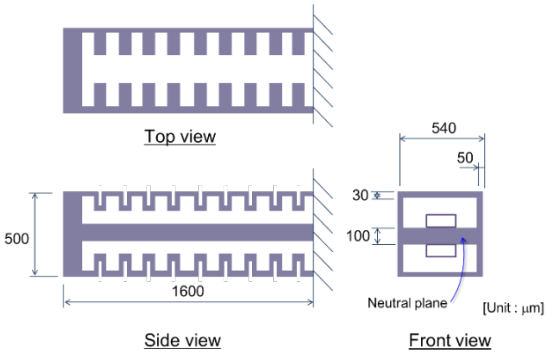
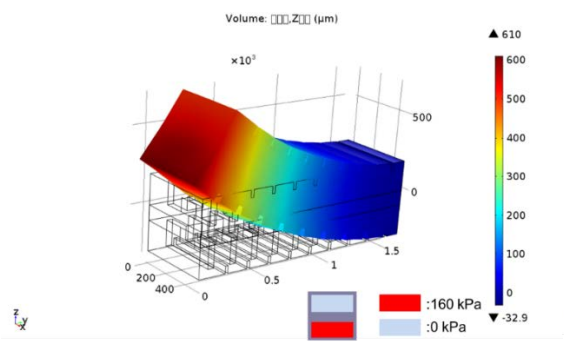
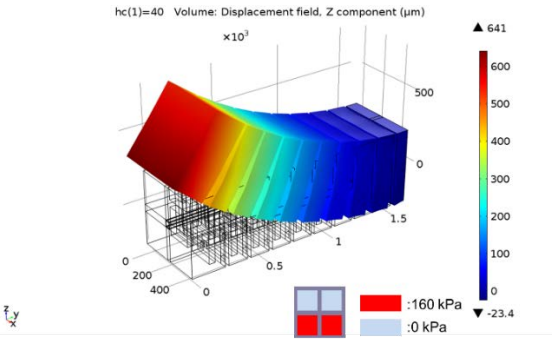


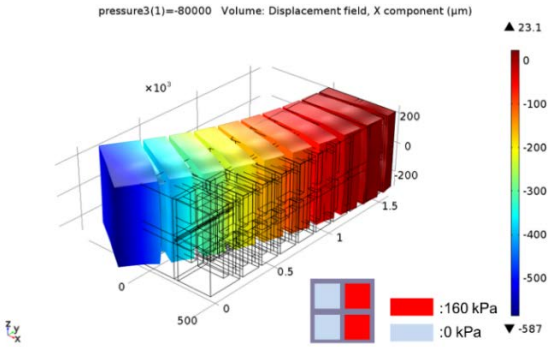
Fig. 5.2 Schematic of a 2DOF actuator part Fig. 5.3 Schematic of a 1DOF actuator part



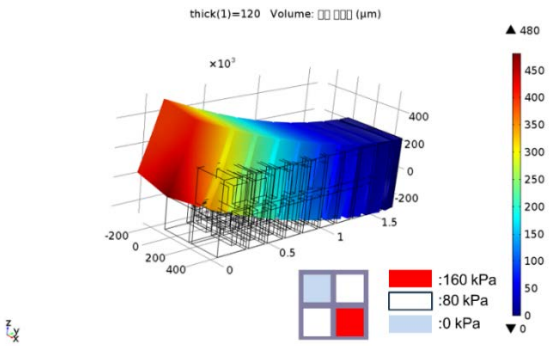
(a)Vertical deflection of a 1DOF actuator



(b)Vertical deflection of a 2DOF actuator



(c) Lateral deflection of a 2DOF actuator



(d) Diagonal deflection of a 2DOF actuator

Fig. 5.4 Comparison between 1DOF actuator part and 2DOF actuator part

これらの FEM 解析結果に基づいて，2 自由度 PDMS アクチュエータ部の試作

を行った．その概略図を図 5.5 に示す．製作方法は基本的に以前の 1 自由度アクチュエータ部のプロセスと同様であり，その上部，中央部，下部のそれぞれに対応するマイクロ鋳型を SU-8 を用いて 3 インチのガラスウエハ上に製作し，それらを用いて PDMS の成形を行い，各部の接合面を O_2 プラズマ処理して接合することによって 2 自由度アクチュエータ部を製作した．図 5.6 に示す製作したアクチュエータは製作上の都合から全高が 0.43 mm，全幅が 0.49 mm，先端部長さが 0.4mm となり全長が 1.9 mm となった．

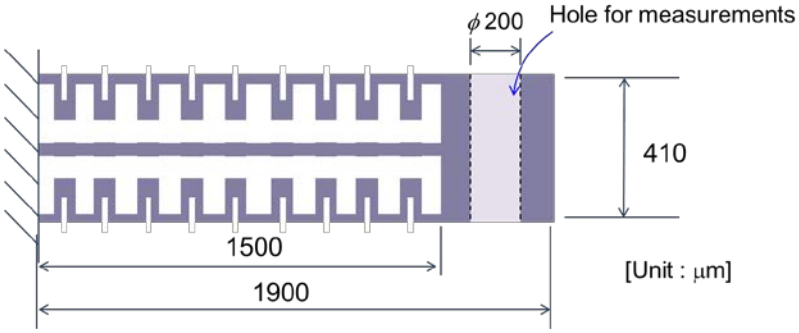
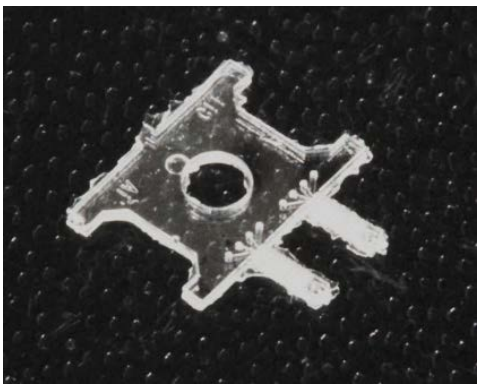
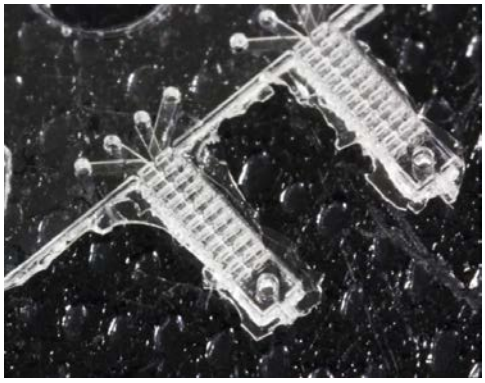


Fig. 5.5 Schematic of a 2DOF PDMS actuator part



(a) Overall view



(b) Enlarged bird’s-eye view

(c) Enlarged side view

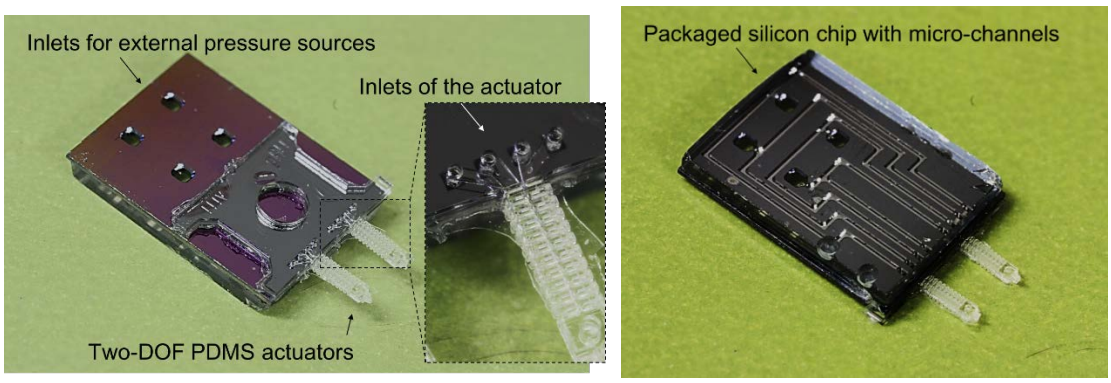
Fig. 5.6 Fabricated 2DOF PDMS actuator parts

5.2.2 空気圧を用いた動作試験

シリコン流路とガラスを陽極接合して製作される空気圧印加試験用のマイクロ流路チップと製作した 2 自由度 PDMS アクチュエータ部(可動部全長 1.9mm)を用いて，空気圧試験用デバイスを製作した．マイクロ流路チップの接合面に CVD で SiO_2 を成膜し，その面と PDMS アクチュエータ部を O_2 プラズマ処理により接合させて製作した実験用デバイスを図 5.7 に示す．

実験用デバイスへの空気圧の印加は，ジグを通して外部からシリンジによって手動操作で行った(図 5.8)．実験用デバイスの 2 自由度アクチュエータの各液圧室に 0.15 MPa の空気圧を加えたときの動作を図 5.9 に示す．実験の結果，アクチュエータ先端部の水平方向と垂直方向の変位はそれぞれ 0.7mm，1.1 mm となった．また，0.15 MPa の空気圧で垂直駆動させたときの最大発生力は 0.8 mN と測定された (図 5.10).

今回の実験で，製作した 2 自由度 PDMS アクチュエータ部が 2 自由度動作を出力することが可能であることが確認された．アクチュエータの各液圧室への印加圧力を適切に変化させれば曲面上の任意方向へのアクチュエータの動作が可能となるため，電磁弁などを用いた制御系を構築し各液圧室への印加圧力を任意に設定することができれば，アクチュエータ先端部の円運動や超小形ねじのねじ回しなどの有意な動作が実現されると思われる．



(a) Face　　(b) Back

Fig. 5.7 Fabricated experimental device for air pressure test

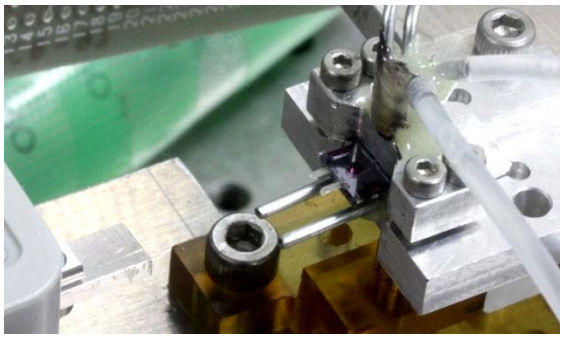
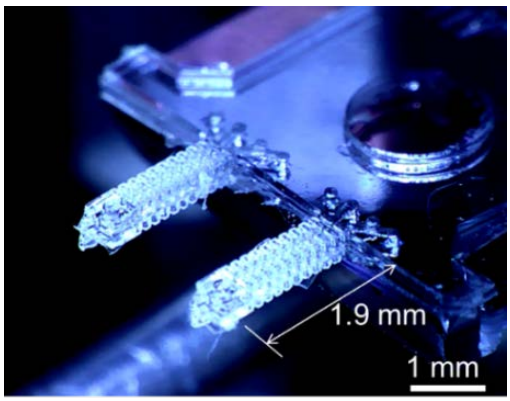
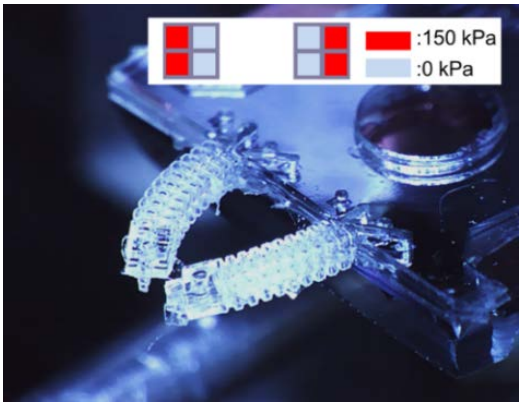


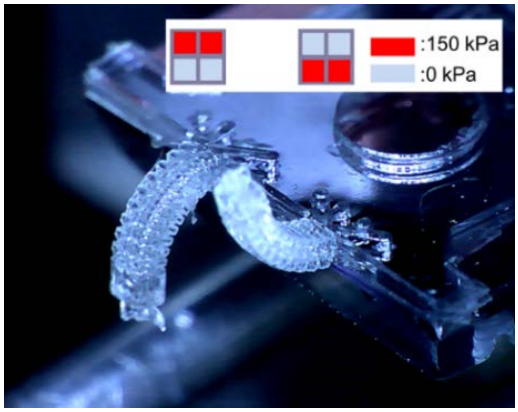
Fig. 5.8 Experimental set up of air pressure test



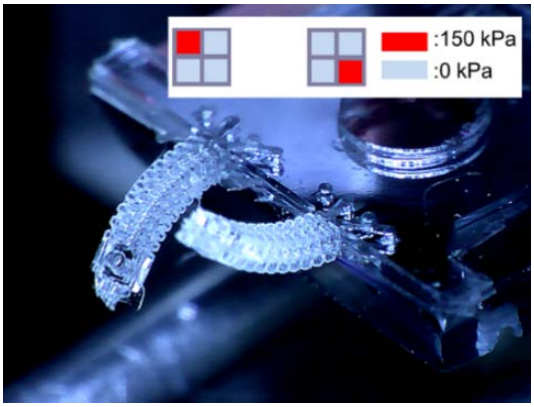
(a) Initial position



(b) Horizontal motion



(c) Vertically opposed motion



(d) Oblique motion

Fig. 5.9 Air pressure tests of a pair of two-DOF PDMS actuator parts

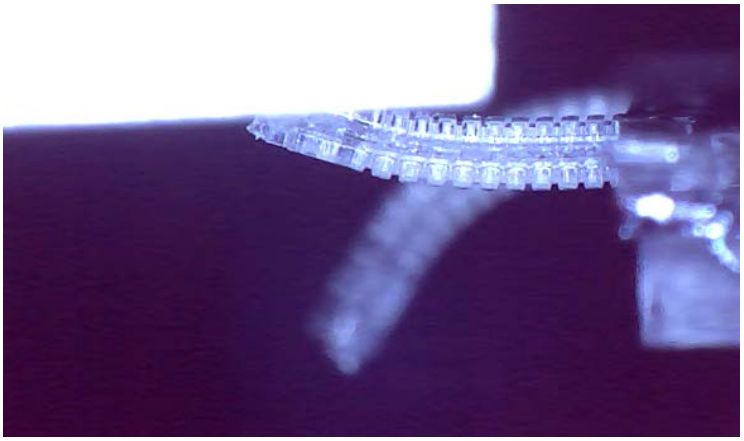


Fig. 5.10 Force measurement

5.2.3 製作プロセスの改良

第 4 章で提案した PDMS 成形プロセスを用いて 2 自由度 PDMS アクチュエータ部を製作することはできたが，さらにサイズの小さい 2 自由度 PDMS アクチュエータ部を，製作プロセスの再現性向上のために一部を変更して製作した．製作プロセスの変更点を図 5.11 に示す．マイクロ鋳型のはく離性能のさらなる向上のために，SU-8 鋳型の最下層にベースレイヤを追加し，雄型，雌型の両方にフルオロカーボンのコーティングを行うこととした．また，雄型をはく離して成形された PDMS の接合面が雌型よりも高くなるように，雄型に雌型のパターンを薄く設けた．これによって，アクチュエータ下部と中央部との PDMS-PDMS 接合の際に，ガラス基板上に単純にスピンコートを行って製作される PDMS 薄膜を中央部として用いることが可能となり，中央部の製作に鋳型が必要とならなくなるため，プロセスの単純化が可能となる．変更した製作プロセスを用いて試作した 2 自由度 PDMS アクチュエータ部の概要を図 5.12 に，試作したアクチュエータ部の写真を図 5.13 に示す．アクチュエータの断面寸法が変更前の製作プロセスのものと比べて小さくなっているが，PDMS アクチュエータ部の微細構造が同様に実現されていることが確認された．

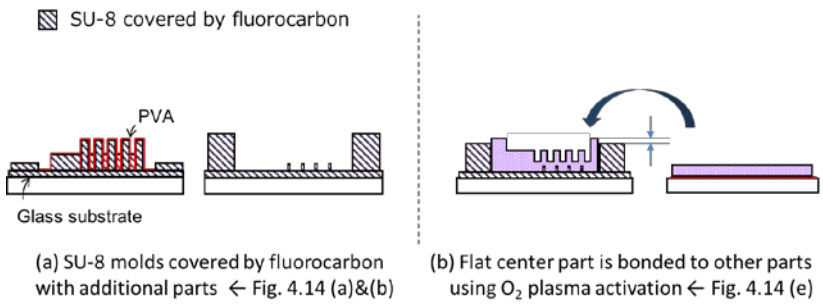


Fig. 5.11 Changed parts of proposed PDMS fabrication process

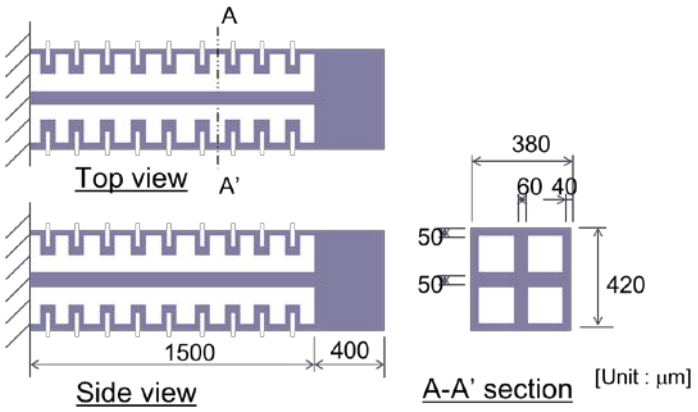


Fig. 5.12 Schematics of 2DOF PDMS actuator part with narrow cross section

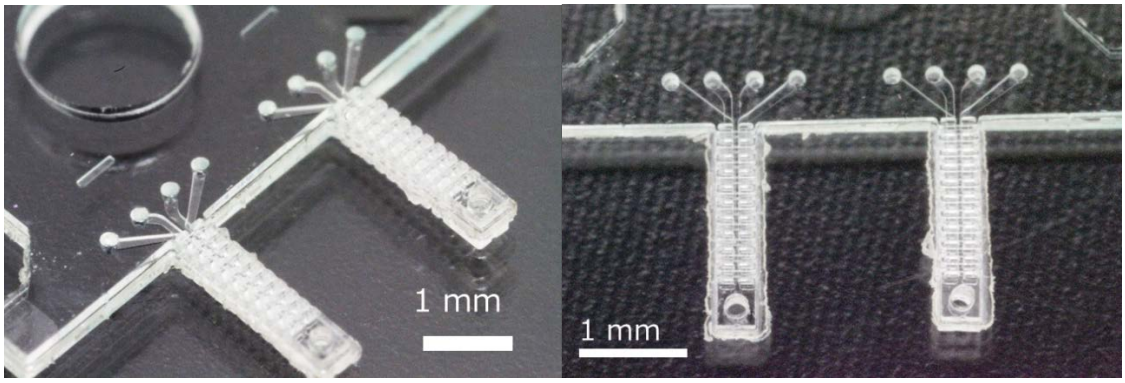


Fig. 5.13 Fabricated 2DOF PDMS actuator parts with narrow cross section

5.3　バルブ・ポンプ搭載形マイクロ流体チップの試作

本論文が提案する交流圧力駆動多自由度 ER マイクロアクチュエータシステムにおいて，交流圧力源のマイクロ化は重要な課題である．交流圧力システムはその構成要素(ポンプ，バルブ)の構造を単純化できるという特徴を有しており，例えば交流圧力源は圧電アクチュエータによって駆動されるダイアフラムによって実現可能である．圧電アクチュエータ駆動ダイアフラムは，その弾性特性により，流量が小さい範囲ではその値によらずほぼ一定の振幅の交流圧力を発生することができる [37]．

本節では交流圧力駆動 ER 屈曲アクチュエータシステムのさらなるマイクロ化のために，図 5.14 に示すように交流圧力源，マイクロ流路，ER マイクロバルブを 1 チップ上に構築した流体システム(ER マイクロ流体チップと呼ぶ)の実現を目指す．特に，圧電アクチュエータを駆動源とするマイクロ交流圧力源については，設計，試作，特性実験を通してその評価を行う．

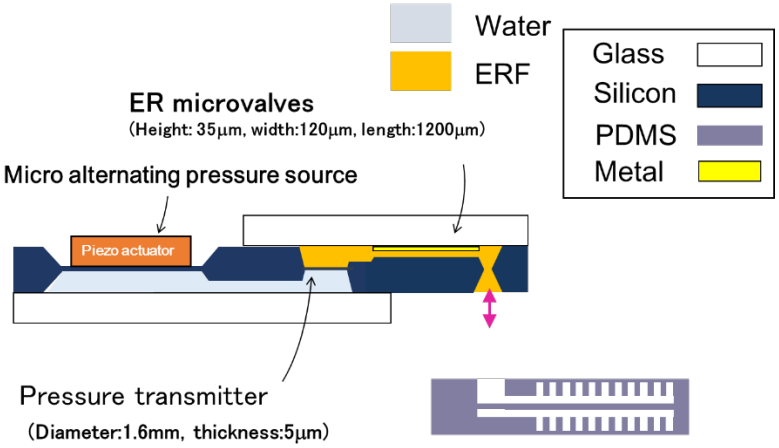
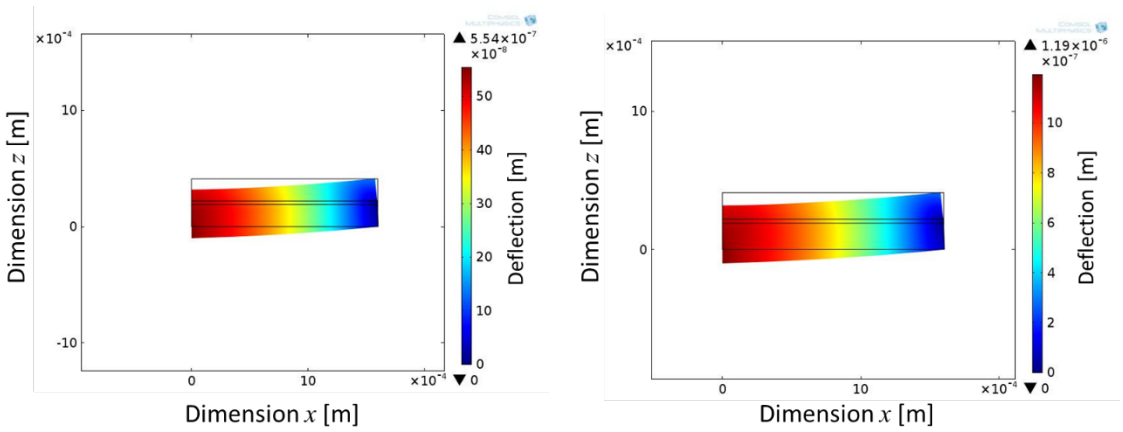


Fig. 5.14 Schematic of ER microfluidic chip

5.3.1 FEM シミュレーションによる設計

提案するマイクロ交流圧力源はガラスとシリコン，圧電アクチュエータから構成される．使用する圧電アクチュエータ(T216-A4NO-073X, Piezo Systems, Inc.)はバイモルフ構造で上下方向に屈曲する円板形アクチュエータであり，直径 3.2 mm，厚さ 0.41 mm，上下面の電極に±180V 印加時に最大変位±1.2 μm，最大発生力±2.4 N である．シリコンはϕ76 mm，厚さ 200 μm のウエハを加工して使用する．シリコン構造体は異方性ウェットエッチングで製作し，ダイアフラムや穴，流路などをウエハ上に一括製作する．ガラスとシリコンの接合に陽極接合を用いることで，流路が閉塞することなくマイクロ流路が確実に形成できるため，これを動作流体充填用マイクロ流路として用いる．マイクロ交流圧力源のダイアフラムと流路を構成するための材料としてシリコンとガラスを用いているのであるが，交流圧力システムにおいて特に圧電アクチュエータのような変位の小さいものを駆動源とする場合，流路のコンプライアンスが小さいことが非常に重要になる．シリコンとガラスはフォトレジストのようなプラスチックと比較してヤング率が高く流路のコンプライアンスを低くすることが可能なため，交流圧力システムに適している．

円板形圧電アクチュエータ単体でその屈曲変位をシミュレーションした結果，図 5.15(a)に示すように最大変位が±0.54 μm となった．実際に使用するアクチュエータ性能との差が生じているため，圧電アクチュエータの最大変位が±1.2 μm，最大発生力±2.4 N となるようにコンプライアンス行列とカップリング行列を調整した．これ以降のシミュレーションではこれらの調整したパラメータを用いる．



(a) With initial parameters　　(b) With modified parameters

Fig. 5.15 Free deflection of piezo disc actuator

マイクロ交流圧力源の設計のために行うシミュレーションに用いたモデルを図 5.16 に示す．このモデルはシリコンのダイアフラム部，円板形圧電アクチュエータとそれらに挟まれる接着剤の層から構成される．今回は，ダイアフラム半径 R_d，ダイアフラム厚さ t_d，接着層厚さ t_a，接着層のヤング率 E_y をパラメータとしてシミュレーションを行った．また，シミュレーション中は駆動時に生じるポンプ室内圧力によって 0.3MPa がダイアフラム下面に加わっているものとする．シミュレーションに用いたジオメトリを図 5.17 に示す．

ダイアフラム半径 R_d とダイアフラム厚さ t_d を変化させたシミュレーション結果を図 5.18 から図 5.20 に示す．このシミュレーションでは接着層厚さ t_a=0.5 μm，接着層のヤング率 E_y=40 MPa としている．図 5.18 はダイアフラム下面中央部の変位を示しているが，R_d を小さく t_d を大きくするほど変位量が大きくなっている．また，図 5.19 はダイアフラム下面の半径上の変位を示しているが，R_d を小さく t_d を大きくするほど理想的な変位曲線に近づいていくことがわかる．これらのシミュレーションの傾向は，図 5.20 に示すように R_d の減少と t_d の増加に伴ってダイアフラム端部におけるアクチュエータ変位と反対方向への屈曲が大幅に減少することに起因している．

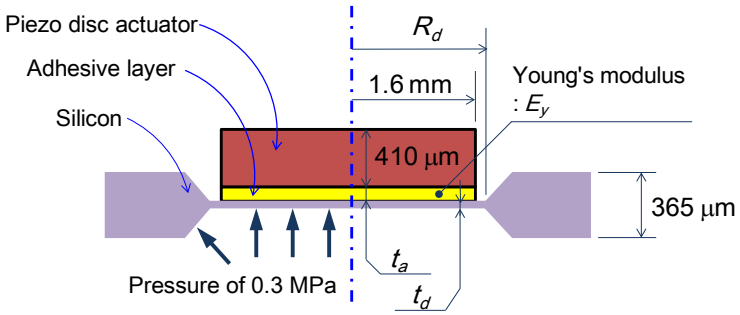


Fig. 5.16 Model for simulation of deflection of silicon diaphragm

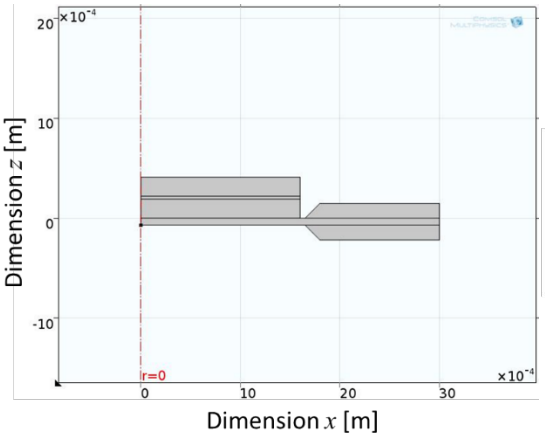


Fig. 5.17 Geometry of axisymmetric model

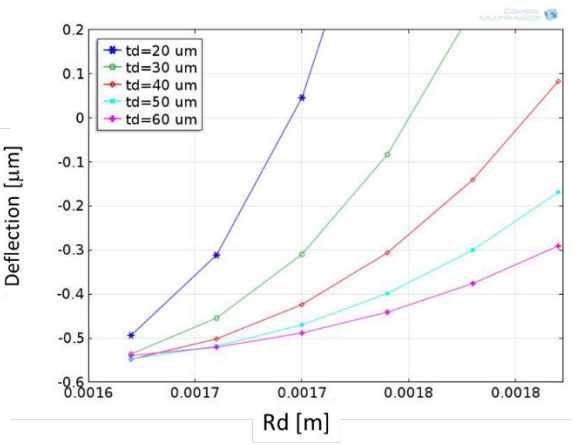
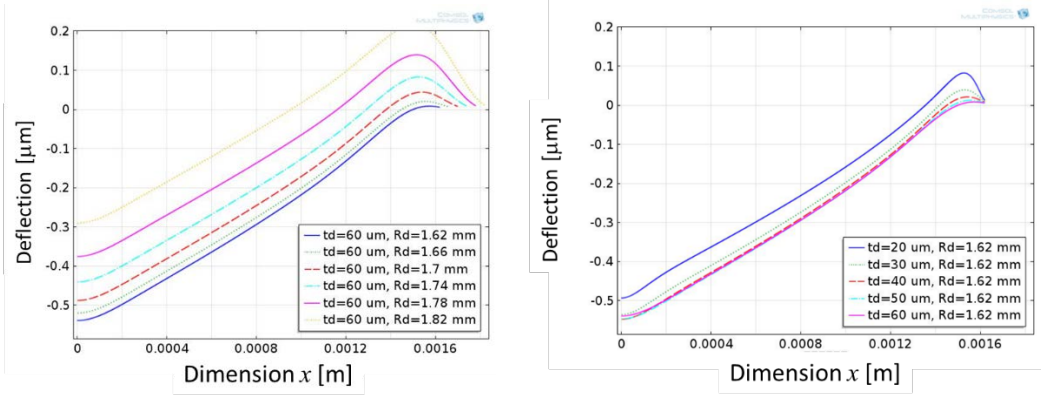
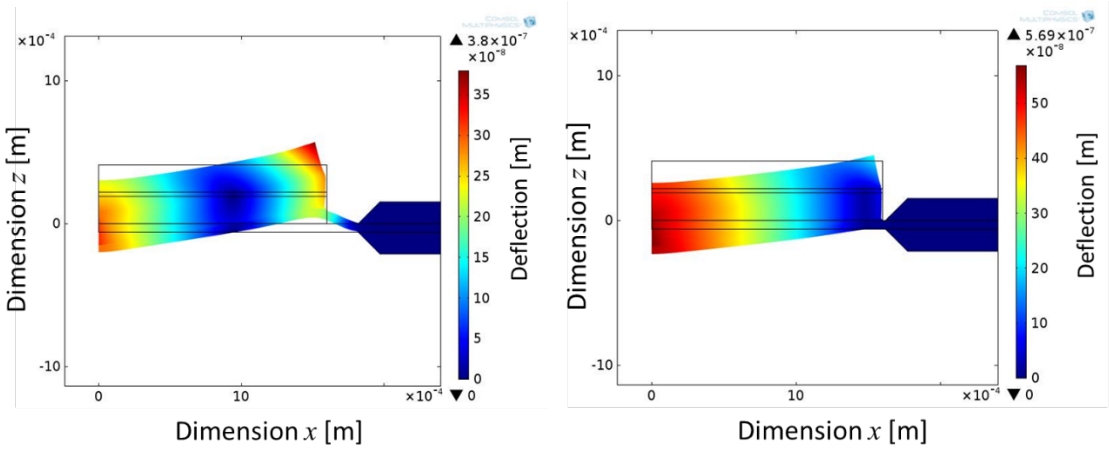


Fig. 5.18 Displacement of center point



(a) R_d modulation　　(b) t_d modulation

Fig. 5.19 Deflection on radius of diaphragm



(a) R_d =1.82mm　　(a) R_d =1.62mm

Fig. 5.20 2D view of deflection

接着層厚さ t_a と接着層のヤング率 E_y を変化させたシミュレーション結果を図 5.21 から図 5.23 に示す．このシミュレーションではダイアフラム半径 R_d =1.64 mm，ダイアフラム厚さ t_d =60 μm としている．Fig. 5.21 はダイアフラム下面中央部の変位を示しているが，t_a を小さく E_y を大きくするほど変位量が大きくなっていることがわかる．また，Fig. 5.22 はダイアフラム下面の半径上の変位を示しているが，t_a を小さく E_y を大きくするほどに理想的な変位曲線に近づいていくことがわかる．これらのシミュレーションの傾向は，Fig. 5.23 に示すように t_a の減少と E_y の増加に伴ってアクチュエータ端部における接着層の変形が大幅に減少することに起因している．Fig. 5.24 はダイアフラム下面へ 0.3MPa の圧力が加わっていないときのダイアフラムの変位を示しているが，この結果では E_y の増加に伴って単純に変位量が増加するといったことは示されていない．

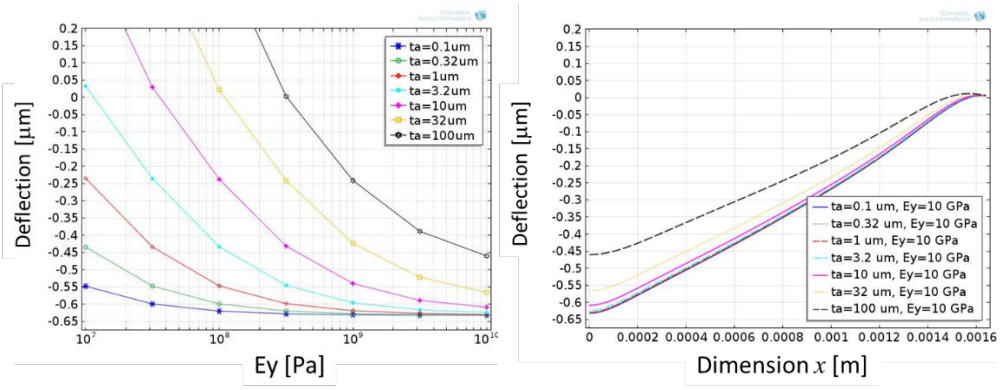


Fig. 5.21 Displacement of center point in variation of t_a and E_y

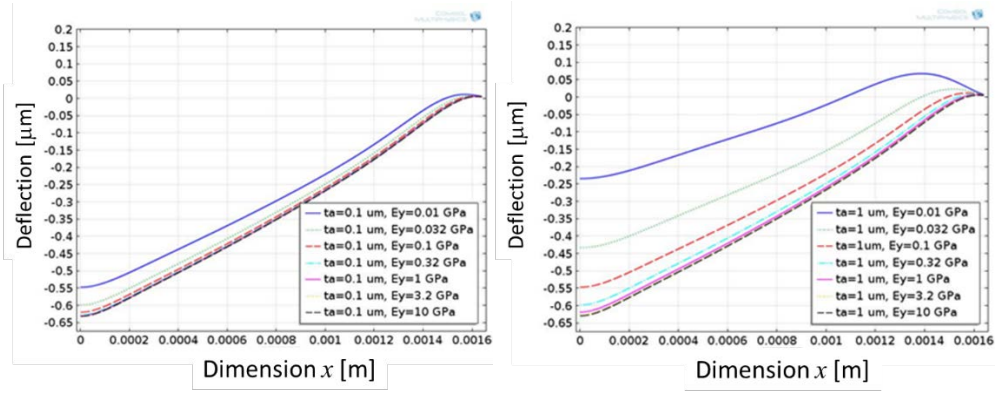
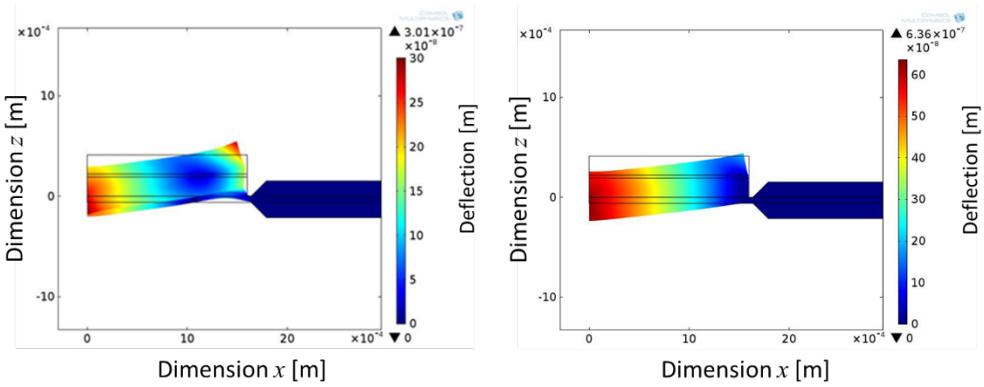


Fig. 5.22 2D view of deflection in variation of t_a and E_y



(a) t_a =1μm and E_y= 0.01 GPa　　(a) t_a =0.1μm and E_y= 10 GPa

Fig. 5.23 2D view of deflection in difference of t_a and E_y

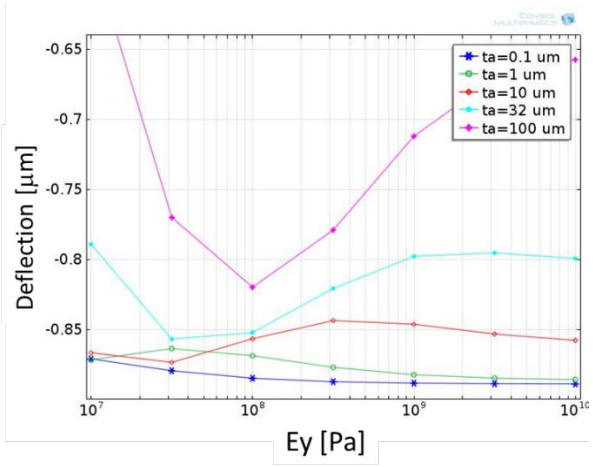


Fig.5.24 Displacement of center point under no pressure

圧電アクチュエータの発生可能な変位は非常に小さく，交流圧力システムにおいては圧電アクチュエータの変形に伴う容積変化の損失をなるべく小さくする必要がある．そこで，提案するマイクロ交流圧力源のコンプライアンスについて特に考慮が必要となる部分についてシミュレーションを行った．

圧力源駆動時のポンプ室内圧力によって生じる，アクチュエータの駆動方向と反対向きのダイアフラムの変位についてシミュレーションを行った．0.3MPa の圧力がダイアフラムに加えられるものとしてダイアフラム直径 D_1=2R_d と厚さ t_d を変化させてシミュレーションを行った．ジオメトリを図 5.25 に，変位の様子を図 5.26 に，D_1，t_1 を変化させたときのダイアフラム変位のグラフを図 5.27 に示す．ダイアフラムの直径 D_1 が 3.8mm と 3.6mm においては，メンブレンの変位 2.4 μm に対して，0.3 MPa の静圧によって反対方向にダイアフラムが変位する割合が非常に大きくなっていることがわかる．

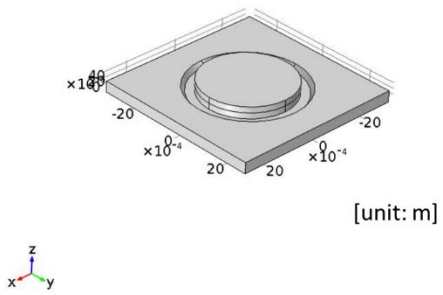


Fig. 5.25 Geometry of the simulation

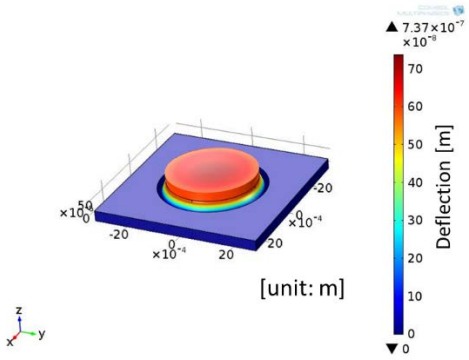


Fig. 5.26 Motion of the pressurized diaphragm

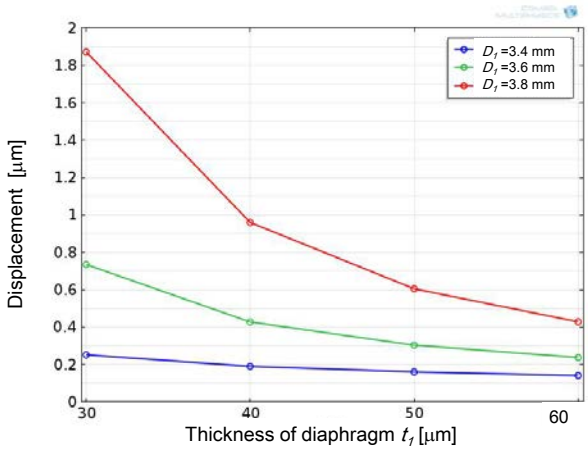
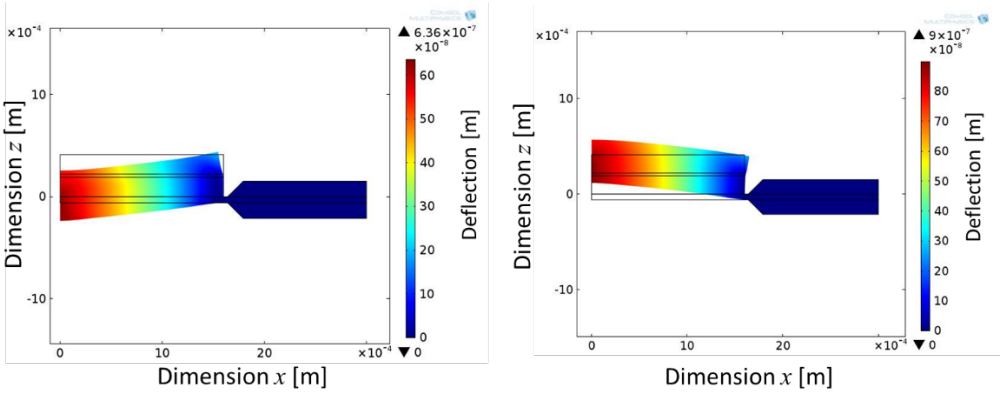


Fig. 5.27 Displacement due to pressure vs. thickness and diameter of diaphragm

ダイアフラム半径 R_d=1.64 mm，ダイアフラム厚さ t_d=60 μm, 接着層厚さ t_a=0.5 μm, 接着層のヤング率 E_y=1 GPa として上下方向に駆動させた際の変形を図 5.28 に示す(上方向駆動時はダイアフラム下面への圧力は 0 としている). ダイアフラム中心部変位は上下方向にそれぞれ 0.64 μm，0.9 μm で，変位量の合計は 1.54 μm であり，アクチュエータ単体で駆動させたときの変形量の合計 2.4 μm と比較すると変形量が 36%ほど減少しており，その分圧力源として駆動させたときの 1 ストロークあたりの排除体積も減少することになるが，本研究の試験デバイスには有効であると思われる.



(a) Downward motion　　(b) Upward motion

Fig. 5.28 2D view of deflection with R_d:1.64 mm, t_d :60 μm, t_a:0.5 μm, E_y:1 GPa

5.3.2 ER マイクロ流体チップの製作プロセスの検討

ER マイクロ流体チップの各部の接合について図 5.29 に示す. 本章で提案する ER マイクロ流体チップの場合，①陽極接合②導電性接着剤による接着③スタンピングによる接着の 3 種類の接合を行う．各接合プロセスを以下で説明する.

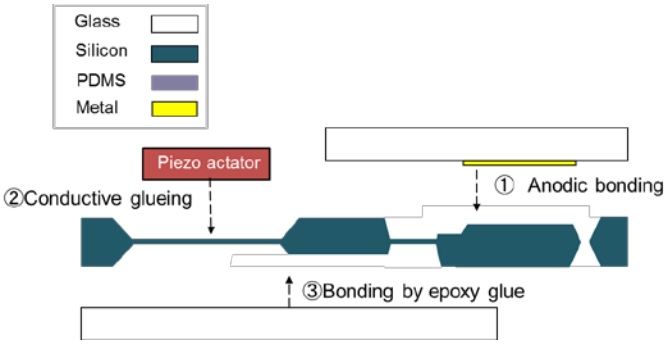


Fig. 5.29 Bonding methods used for fabrication of ER microfluidic chips

①陽極接合による ER マイクロバルブの構築

第 4 章の 1 自由度 ER 屈曲アクチュエータの組み立ての際に用いたプロセスを用いて，電極付きガラスとシリコン流体チップとの陽極接合を行う．図 5.30 に示すように，この陽極接合プロセスによって，ER マイクロバルブと動作流体充填用流路などの構築を一括で行う．

Fig. 5.30 Anodic bonded silicon fluidic chip with glass having electrodes

②導電性接着剤によるマイクロ液圧源の構築

円板形圧電アクチュエータとシリコンダイアフラムの接合にはエポキシ接着剤(E-30CL, Loctite, 2250 mPa·s)と導電性エポキシ(CW2400, Circuit Works)を用いた．エポキシ接着剤を圧電アクチュエータに薄くスタンプした後に，塗布したエポキシの一部をウエスでふき取り，その部分に導電性エポキシを少量付着させることによって接着剤の塗布を行う．また，圧電アクチュエータとダイアフラムの接着時に薄く均一な接合面が得られるように，アクチュエータとダイアフラムを上から力を加えて押さえつけたまま加熱を行い，接着剤を硬化させた．接着の概略図を図 5.31 に示す．

新しい方法で接着したダイアフラムの変位をレーザ変位計で測定したところ(図 5.32)，-180V から+180V に印加電圧を変化させたときのダイアフラム変位は約 1.6 μm となり，シミュレーション値と同等の値となった．

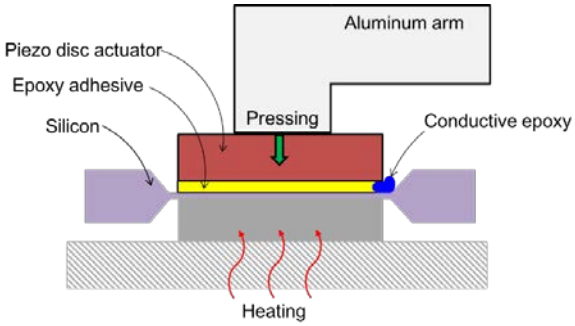


Fig. 5.31 Schematic of bonding between piezo disc and diaphragm

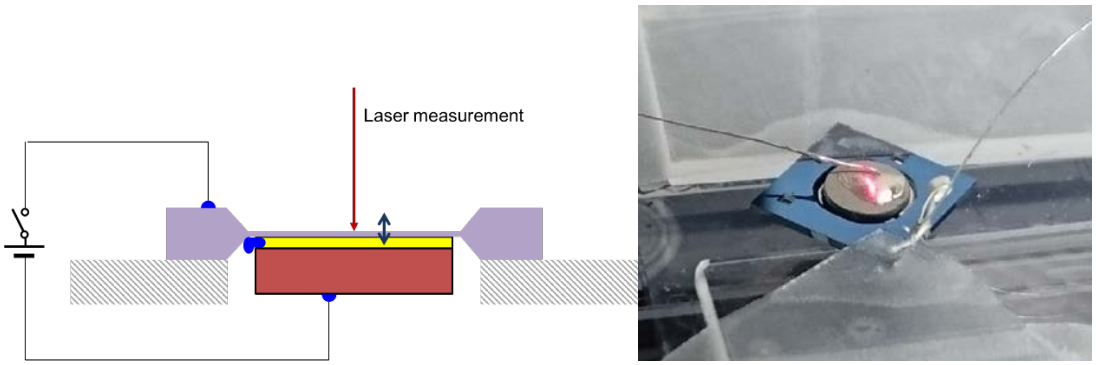


Fig. 5.32 Laser displacement measurement of single diaphragm driven by piezo disc

③スタンピングによるチップ下部のマイクロ流路形成

スタンピングによる接着は以下に示す手順で行った．

i. エポキシ接着剤(E-30CL, Loctite, 2250 mPa·s)を 20mm ×20mm ×0.2 mm のポリイミドシート上にスピンコートする（1500rpm 20s, 5000rpm 60s）

ii. スピンコートした面に対してアルミ箔を均一に貼り付け，剥がすことによってポリイミドシート上の接着剤の余剰分を除去した後，表面を平滑化するためにホットプレートで 60℃，30s 加熱する

iii. シリコンチップをポリイミドシート上に密着させた後シートを剥離し，シリコンチップへ接着材をスタンプする

iv. シリコンチップとガラスを密着させて，ホットプレート上で 70℃，60 min の加熱を行い硬化させる

接着結果を図 5.33 に示す．接合部の写真において流路部近傍以外において所々変色している箇所が見られる．この変色した領域においては接合が不完全となっていると思われるが，接合条件を変更することで改善可能だと思われる．

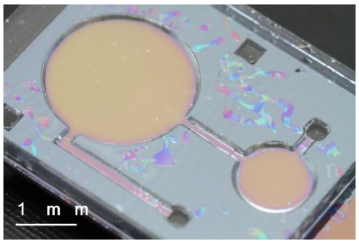
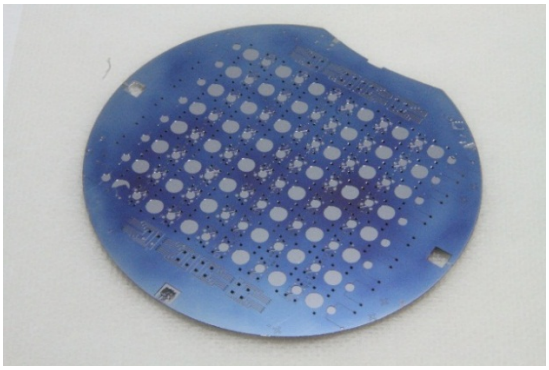


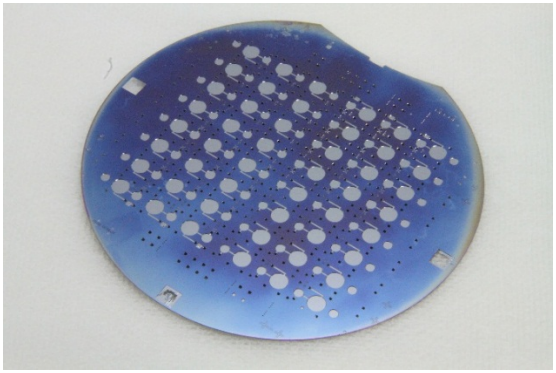
Fig. 5.33 Photocopy of stamping-bonding result

5.3.3 マイクロ交流圧力源の試作と特性実験

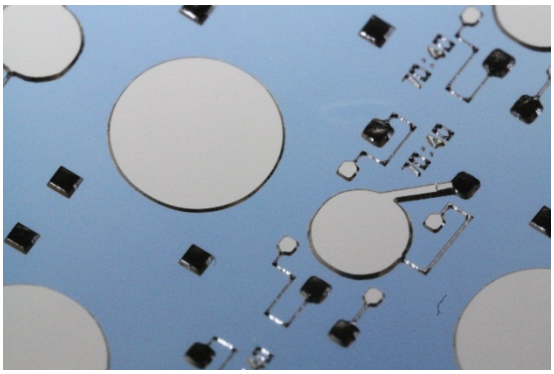
マイクロ交流圧力源単体の特性評価のために実験用デバイスを試作した．エッチングにより加工を行ったシリコンウエハを図 5.34 に示す．エッチングを行ったシリコンウエハについて各部の寸法を表面形状測定装置（株式会社アルバック，DEKTAK）で測定した値を図 5.35 に示す．測定値は該当箇所の異なる点 2 箇所について測定した結果の平均値を示している．測定の結果，圧力伝達部のダイアフラム部厚さは 5μm 程度であった．直径 1.6 mm，厚さ 5μm のダイアフラムの圧力伝達部において 1%以下の圧力損失となることがわかっており，今回製作したダイアフラム厚さについてはほぼ設計どおりに加工が行えた．ダイシングしたシリコンチップを用いて製作したマイクロ交流圧力源を図 5.36 に示す．



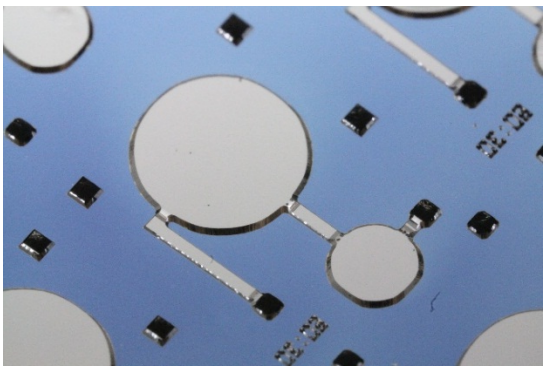
(a) Face



(b) Back



(c) Enlarged view of the face



(d) Enlarged view of the back

Fig. 5.34 Anisotropic etched silicon wafer for micro alternating pressure source

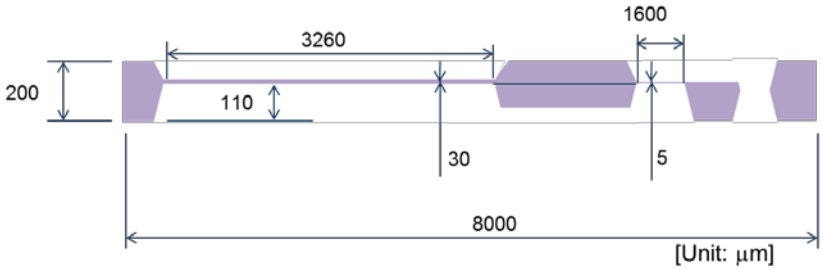


Fig.5.35 Measured values of silicon structures

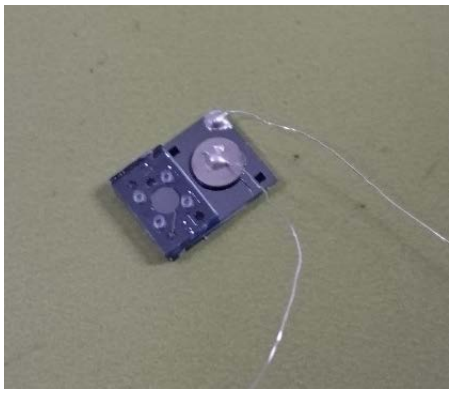


Fig. 5.36 Fabricated micro alternating pressure source

ER マイクロアクチュエータシステムへの動作流体(ERF, 水)の充填の際には，動作流体の入った外部タンクを用意して，そのタンクとデバイスを流体的に接続し，真空引きを行って動作流体をデバイス内に充填し，充填完了後はタンクとデバイスの流体的接続を遮断する．交流圧力システムはその動作時における流路のコンプライアンスの管理が非常に重要であり，ER マイクロバルブより上流の部分においてコンプライアンス値は可能な限り小さくする必要がある．従来は外部タンクとデバイスの接続に柔軟なゴムチューブを用いて，流路の遮断はチューブを機械的につぶすことによって行っていたが，ゴムのような柔軟な物体の存在によってシステムのコンプライアンスが大きく損なわれている可能性があった．

そこで，デバイスの流路のコンプライアンスを小さく維持しつつ外部タンクとの流体接続が可能となるように流体接続の方法を検討した．従来の交流圧力システムの実験でポリエチレンのような硬い樹脂を流体接続に使用してもコンプライアンスが大きく損なわれることはないことがわかっているため，3D プリンタを用いたシール機構を製作した．

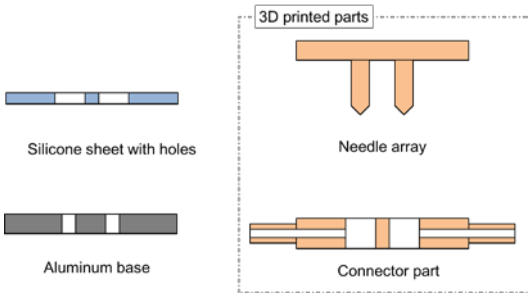
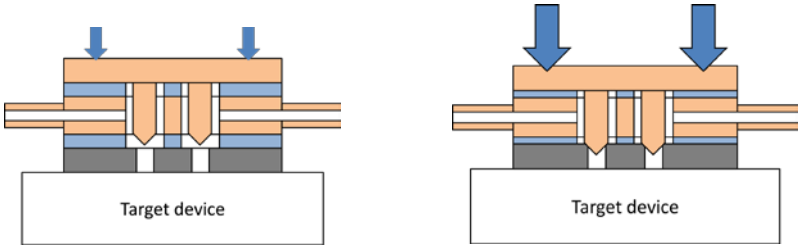


Fig. 5.37 Schematics of seal system



(a) Open state　　(b) Cutoff state

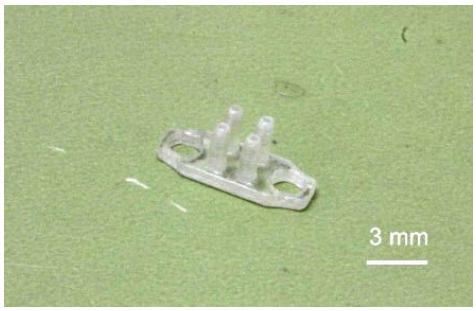
Fig. 5.38 Sealing actions of 3D printed stop valves

製作したシール機構は図 5.37 の概要図で表されるように，3D プリンタで出力されたニードルアレイ，コネクタとアルミニウム製の台座，穴付きのシリコーンゴムシートで構成される．アルミニウム製台座は機械加工で製作し，これをデバイスと接着材で固定する．

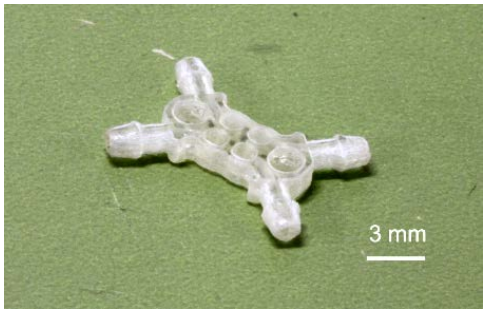
シールは各部品をねじで締め付けることによって行う．図 5.38 (a) に示すように外部タンクとの接続を行って充填する際にはコネクタを通して外部タンクとデバイスは流体的に接続される．遮断する際には図 5.38(b) のようにねじを強く締めてゴムシートを圧縮させてニードルと台座を押し付け合わせる．

図 5.39 に示す試験デバイスを組み立ててシール特性について実験を行った．実験の結果，ねじの締めつけ具合によって流路の導通と遮断を切り替えられることがわかった．また，ERF (JD5036XX) に 1 日中浸しても 3D プリンタで出力した各部品の機械的強度が顕著に低下することが無いことも確認した．

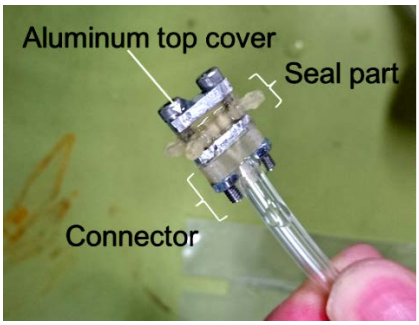
NC フライスなどの機械加工では製作がやや複雑になるような構造の流体部品を 3D プリンタで比較的小さく製作することによって MEMS プロセスで製作される微小な流体システムに対して有効なシールを行うことができることがわかった．シール機構の主要な部品を 3D プリンタで製作することによって，MEMS デバイスの設計の変更 (デバイスの充填用穴の位置やサイズの変更など)に対して柔軟に対応することができる．



(a) 3D printed needle array



(b) 3D printed connector



(c) Test device

Fig. 5.39 Seal system for micro device

マイクロ交流圧力源の実験用デバイスを用いて特性実験を行った．本特性実験では，図 5.40 のようにマイクロ交流圧力源の出力ポートに直径 1.2mm，厚さ 5um のダイアフラムを有する流体チップを接続し，マイクロ交流圧力源の圧電アクチュエータを交流電圧で駆動したときに出力される流量と圧力をダイアフラムの変形により測定する．動作流体は脱イオン水とし，マイクロ交流圧力源内への作動流体の充填とシールには，3D プリンタで製作されたシール機構を用いた．本特性実験に用いたデバイスを図 5.41 に示す．ERF を動作流体とした交流圧力システムでは 10Hz 以上の周波数帯の交流圧力が用いられるため，マイクロ交流圧力源の周波数特性が特に重要であり，本特性実験では圧電アクチュエータの駆動周波数をパラメータとして実験を行う．

測定用のダイアフラムの変位の測定はレーザ変位計を用いて行った．図 5.42 に示されるように，ダイアフラム中央部にレーザのスポットが位置するように調整した．レーザ変位計の測定値にはノイズ除去のために 300Hz のローパスフィルタをかけており，サンプリング周波数は 10kHz である．

マイクロ交流圧力源の圧電アクチュエータに入力する正弦波交流電圧の振幅を 180V で固定し周波数を変化させたときのダイアフラムの変位の時間変化を図 5.43 に，ゲイン特性曲線を図 5.44 に示す．試作した交流圧力源のバンド幅は少なくとも 200Hz 以上であることが確認された．ER マイクロバルブの応答性

(~10Hz)と比較して十分に高い周波数応答性となった．計測時のノイズとレーザ変位計の測定値出力のローパスフィルタ設定の関係上，高周波数帯の正確な測定は本測定装置を用いる上では困難だと思われる．また，バンド幅以外の発生圧力や流量などといった特性は明らかになっていないため概算手法の検討が必要である．このマイクロ交流圧力源の実験では，直径 3.2mm の圧電アクチュエータの±1μm 程度の微小振動を流量に変換して圧力伝達部を隔てて別の位置のダイアフラムを駆動することに成功した．

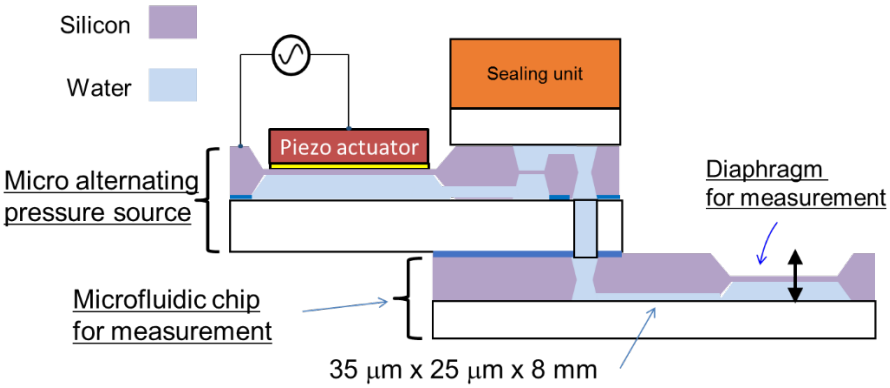
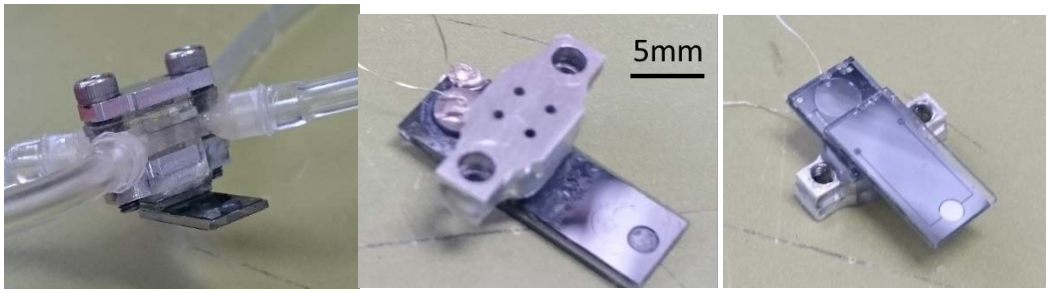


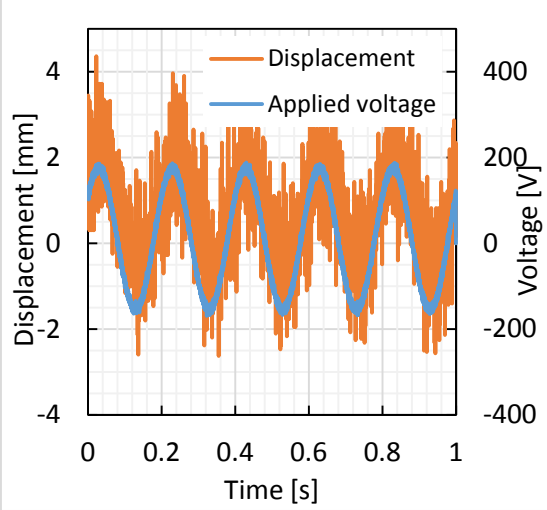
Fig. 5.40　Schematic of experiments of the pressure source



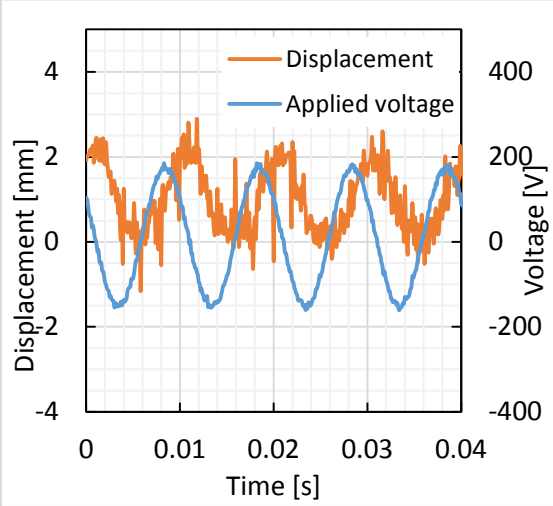
(a) With sealing unit　　(b) Top view　　(c) Back side

Fig.5.41　Fabricated micro alternating pressure source

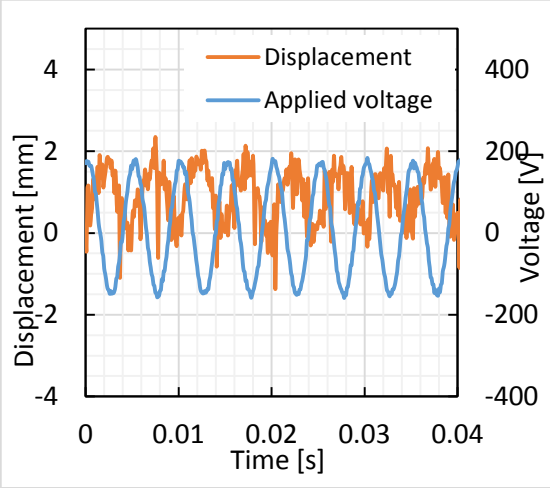
Fig. 5.42 Measurement of deflection of micro-diaphragm by laser displacement meter



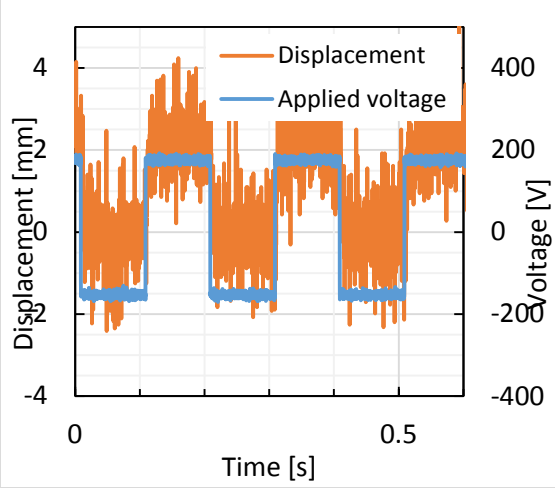
(a) 5Hz, sinusoidal input



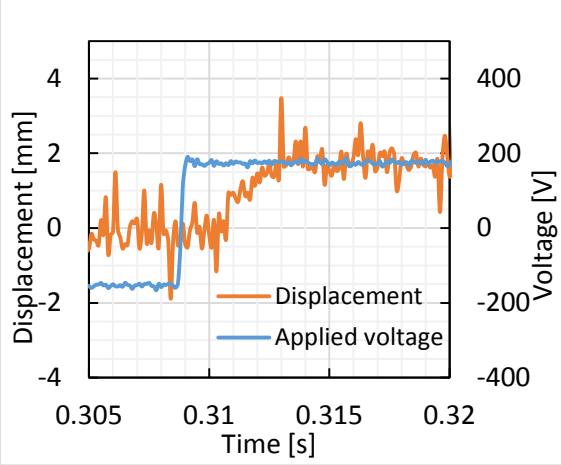
(b) 100 Hz, sinusoidal input



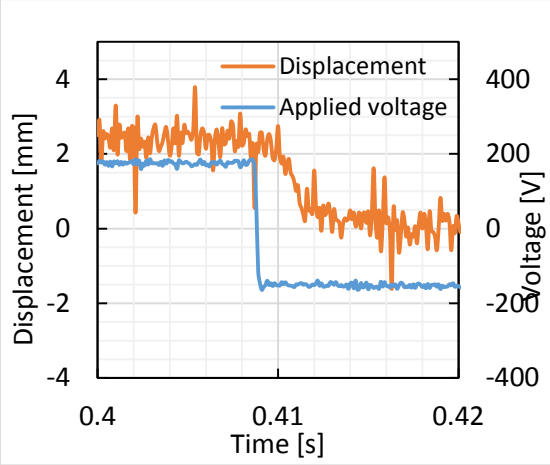
(c) 200 Hz, sinusoidal input



(d) 5Hz, square input



(e) Step-up response



(f) Step-down response

Fig. 5.43 Displacements of silicon diaphragm for measurement vs. time

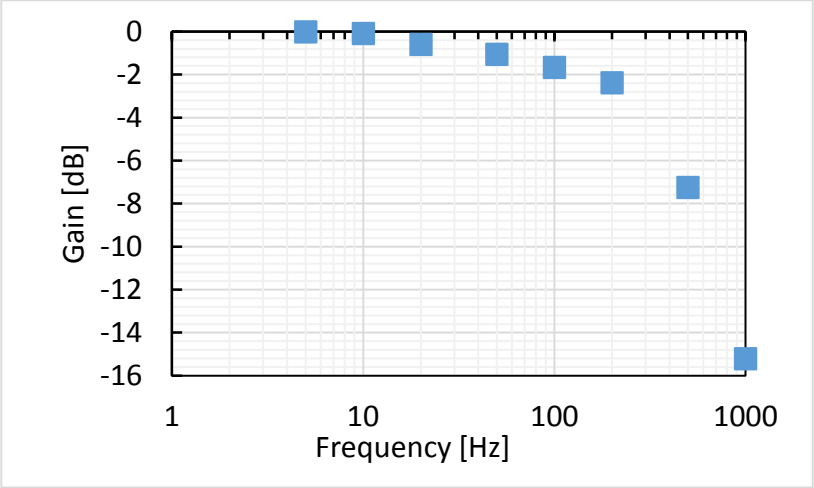


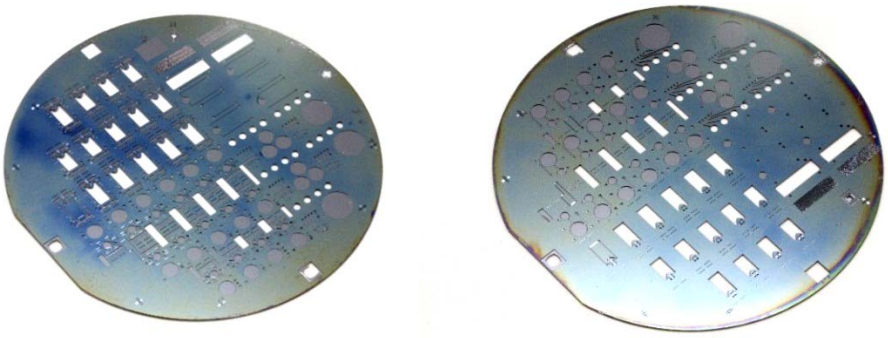
Fig. 5.44 Gain characteristic curve of experimental device of micro alternating pressure source

5.3.4 ER マイクロ流体チップの試作

ER マイクロ流体チップの試作のために，第 4 章の 1 自由度屈曲アクチュエータの実験結果を基準として ER マイクロバルブの流路寸法の設計を行う．設計した値(流路高さ H_{ER}，流路長さ L_{ER}，流路幅 B_{ER}，アクチュエータの立ち上がり時間(供給圧力 0.3MPa))を表 5.1 にまとめて示す．表中の立ち上がり時間は流路抵抗の比率によって算出している．流路高さは 40μm と 30μm となるようにし，それに伴い流路長さを短くした．

Table 5.1 Design values for new ER microvalves

No.	H_{ER} [μm]	L_{ER} [μm]	B_{ER} [μm]	Rise time of actuator (JD5036XX) [s]	Note
1	47	2000	100	1.1	Reference (1DOF actuator)
2	40	1200	100	0.55	Estimated values (2DOF actuator)
3	40	800	100	0.37	Estimated values (2DOF actuator)
4	30	1200	100	1.27	Estimated values (2DOF actuator)
5	30	800	100	0.846	Estimated values (2DOF actuator)



(a) Face part　　(b) Back part

Fig.5.45 Fabricated silicon wafer

ER マイクロ流体チップのシリコン流体チップ試作のためにシリコンエッチングで微細加工を行ったシリコンウエハを図 5.45 に示す．2 枚のシリコンウエハについて加工を行い，各ウエハの流路高さはそれぞれ 30μm と 40μm となるように調整した．ウエハをダイシングして取り出したシリコン流体チップを図 5.46 に示す．各部の寸法を表面形状測定装置（株式会社アルバック，DEKTAK）で測定した結果，流路高さ H_{ER}: 30μm を目標値として製作したウエハについては，流路高さ 31 μm，ダイアフラム厚さ 5.6 μm(圧力伝達部)，34 μm(マイクロ交流圧力源用)となり，流路高さ H_{ER}: 40μm を目標値として製作したウエハについては，流路高さ 41 μm，ダイアフラム厚さ 3.1 μm (圧力伝達部)，31 μm (マイクロ交流圧源用)となった．今回の製作物は設計値との多少の誤差はあるが実験の使用に際して問題が発生するものではない．

電極付きガラスチップは Pyrex ガラス上にクロムと金を蒸着し，パターニングを行い，ダイシングすることで製作した．図 5.47 は電極付きガラスチップとシリコン流体チップを陽極接合したものである．ここでは後工程の PDMS-SiO_2 接合のために，裏面に CVD によって 200 nm 厚程度の SiO_2 を成膜している．圧電アクチュエータとシリコンダイアフラムとの導電接着と，シリコン流路チップ下部とガラスのスタンピングによる接着については次節の始めで記述する．

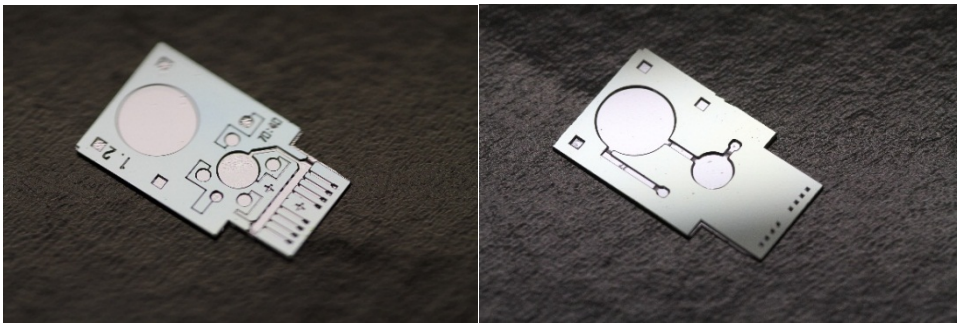
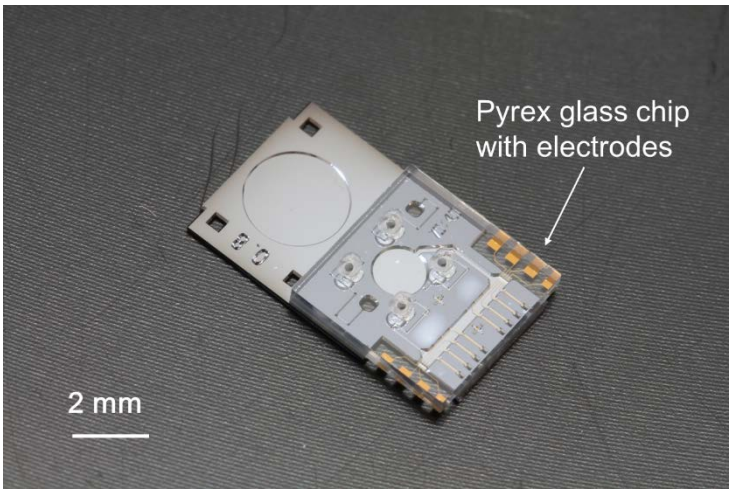
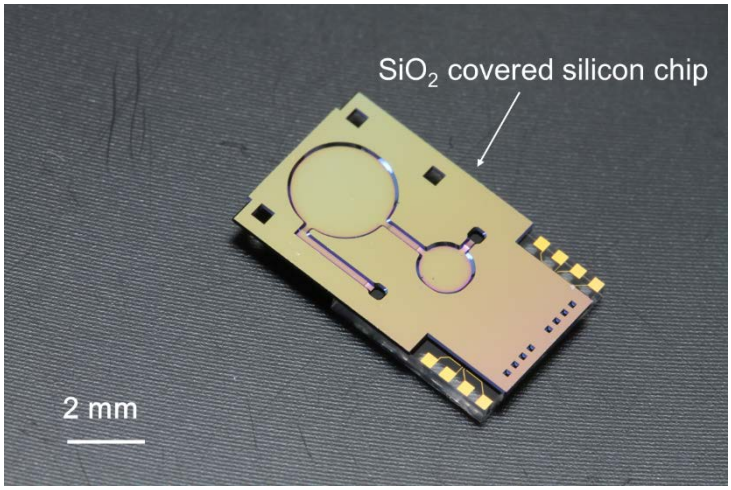


Fig. 5.46 Silicon chip for ER microfluidic chip



(a) Face

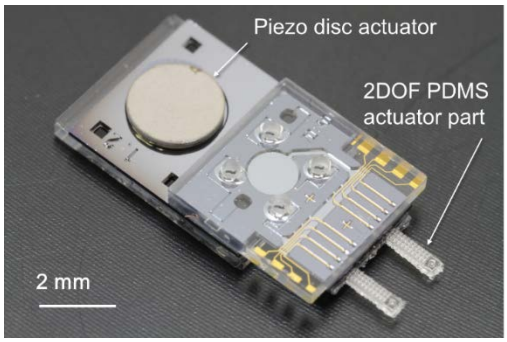


(b) Back surface with SiO_2 deposition

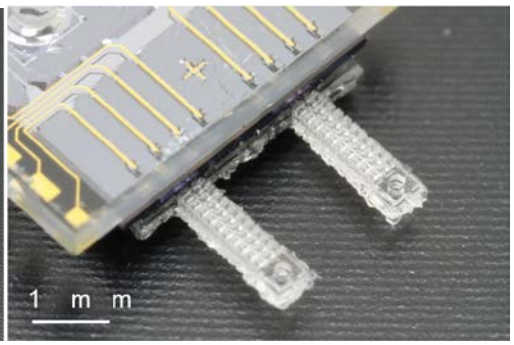
Fig. 5.47 Fabricated ER microfluidic chip for 2DOF ER bending actuator system

5.4　2 自由度 ER 屈曲アクチュエータの特性実験

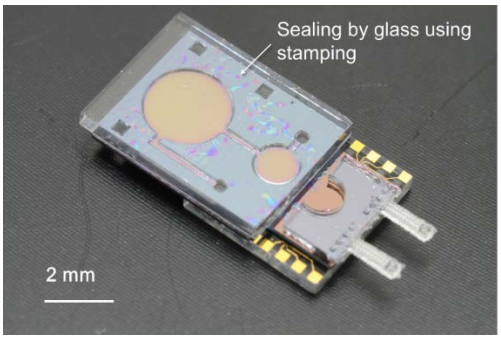
システムの特性評価に用いる実験用デバイスの試作のために, 1 チップ上に交流圧力駆動 2 自由度 ER 屈曲アクチュエータシステムを構築する．5.3 節の最後に述べた図 5.47 の流体チップに対して，①ダイアフラムへの円板形圧電アクチュエータの接着, ②スタンピングによるチップ裏面へのバルクガラスの接着, ③ O_2 プラズマを用いた表面活性化による ER マイクロ流路チップと PDMS アクチュエータ部の PDMS-SiO_2 接合を行った. 以上の工程を経て製作した 2 自由度 ER 屈曲アクチュエータシステムを図 5.48 に示す．②の接着工程においては，Fig. 5.48(e)に示されているように, 接合部に空気が多少入り込んでいるが気密性が損なわれることはないと思われる．ER マイクロバルブは流路高さ $H_{ER} = 41$ μm，流路長さ $L_{ER} = 1.2$ mm，流路幅 $B_{ER} = 0.1$ mm を有しており，この実験用デバイスを ER デバイス A と呼ぶこととする．



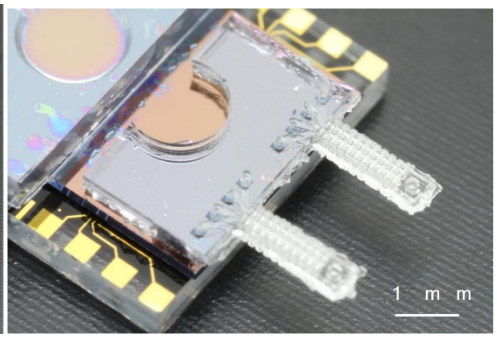
(a) Face



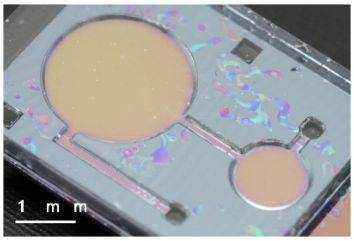
(b) Enlarged view of the actuator part



(c) Back



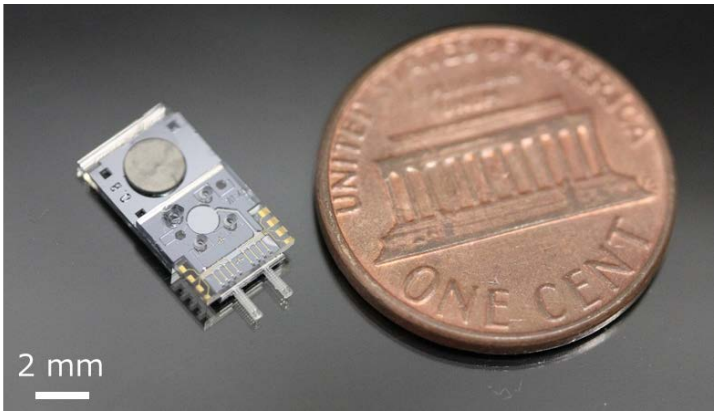
(d) Back of the actuator part



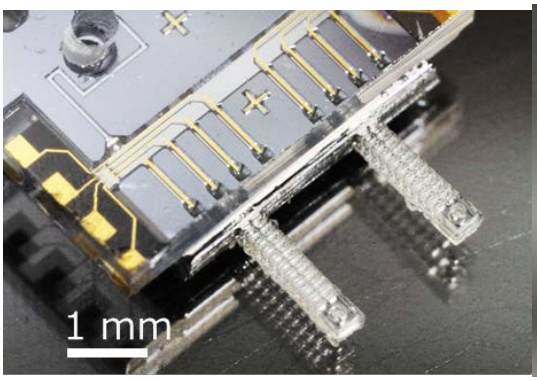
(e) Sealed part using stamping

Fig. 5.48 Fabricated 2DOF ER actuator system (ER device A)

ER デバイス A は，第 4 章で提案した PDMS 成形プロセスで製作された 2 自由度 PDMS アクチュエータ部を用いて構築した．ER デバイス A に加えて，工程の一部を変更した PDMS 成形プロセス(図 5.11)で製作された 2 自由度 PDMS アクチュエータ部を用いた実験デバイスについても試作を行った．試作した交流圧力駆動 2 自由度 ER 屈曲アクチュエータシステムを図 5.49 に示す．追加で試作した実験デバイスは ER デバイス A と比べてその PDMS アクチュエータ部断面寸法が小さくなっており，この実験デバイスを ER デバイス B と呼ぶこととし，ER マイクロバルブは流路高さ H_{ER} = 41 μm，流路長さ L_{ER} = 0.8 mm，流路幅 B_{ER} = 0.1 mm を有している．また，試作した 2 個の実験デバイスには追加の工程としてエポキシ樹脂による流路開放部のシールと圧電アクチュエータへの配線を行った．



(a) Face



(b) Enlarged view of the actuator part

(c) Back

Fig. 5.49 Fabricated 2DOF ER actuator system (ER device B)

試作した実験デバイスによって特性実験を行っていくが，最初に実験系を構築した状態でマイクロ交流圧力源を駆動したときに，圧電アクチュエータの微小振動によって生じる流動が ER マイクロバルブにまで伝達するかどうかについて検証を行う．

ER デバイス B を用いて図 5.50 に示すように実験系を構築した．動作流体はポンプ側とアクチュエータ側の流路系にそれぞれ純水と ERF(JD5036XX)を使用する．マイクロ交流圧力源は振幅 100V の正弦波電圧を印加することにより駆動し，ER マイクロバルブの上部に設置したマイクロスコープ(株式会社キーエンス, VHX-200, 15fps)によって ERF の流動を観察した．実験の様子についてその写真を図 5.51 に示す．

周波数 2Hz でマイクロ交流圧力源を駆動したときの ERF の流動を図 5.52 の比較写真に示す．ERF として用いているネマティック液晶は，その分子構造の異方性とドメイン形成能に起因して観察したときに糸状のパターンが現れる．今回の ERF 流動はそのパターンの挙動を確認することによって行う．図 5.52 に示すように，横に引いた線を基準として両方の写真を見るとパターンが移動していることがわかる．これにより ERF の流動が確認された．

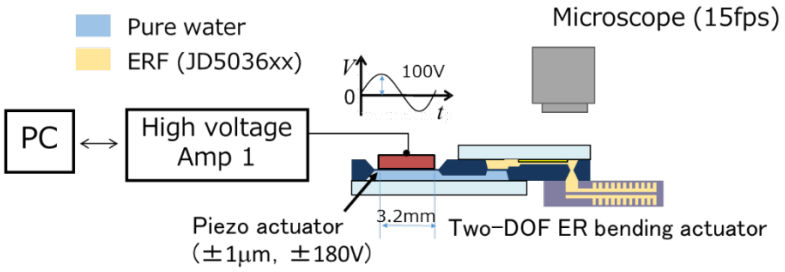


Fig. 5.50 Experimental apparatus for confirming flow of ERF induced by micro vibration of piezo actuator

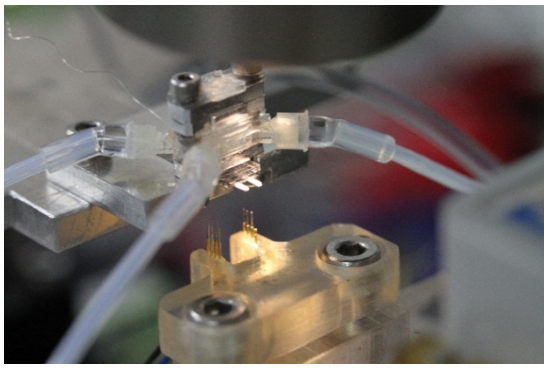


Fig. 5.51 Photocopy of the experiment for confirming ERF flow

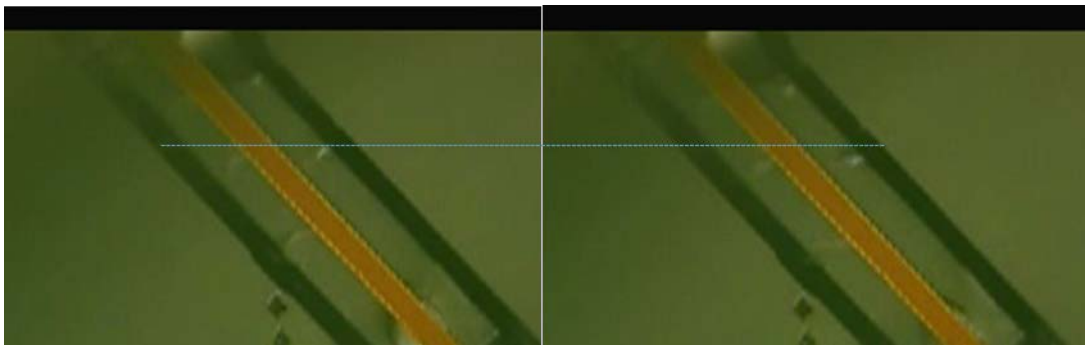


Fig. 5.52 Confirmed ERF flow in a channel of ER microvalve

ER デバイス B を用いて図 5.53 に示す実験系を構築し，交流圧力駆動 2 自由度 ER 屈曲アクチュエータシステムの特性実験を行った．しかし，マイクロ交流圧力源と ER マイクロバルブへの電圧印加を同期してアクチュエータの駆動を試行したが，その屈曲変形を確認するまでに至らなかった．圧電アクチュエータを駆動源とする交流圧力駆動 ER 屈曲アクチュエータシステムは，圧電アクチュエータの変位が微小量(±1μm)であることに起因して流路のコンプライアンスに非常に敏感である．動作流体の充填やそのシール方法などを見直して実験系の再構築の検討を行う必要がある．

また，本章で試作した 2 自由度 ER 屈曲アクチュエータシステムは 2 自由度 PDMS アクチュエータ部と ER マイクロ流体チップをそれぞれ別の基板上に製作し，チップ単位で組み立ててシステムを構築しているが，生産コストの低減のためにはウエハ単位での一括製作を行うことが望ましい．PDMS アクチュエータ部とマイクロ流体チップのフォトマスクの設計の見直し，一括組み立ての手法の検討などを行うことで，ウエハ単位での ER マイクロアクチュエータシステムの構築の実現が可能となる．

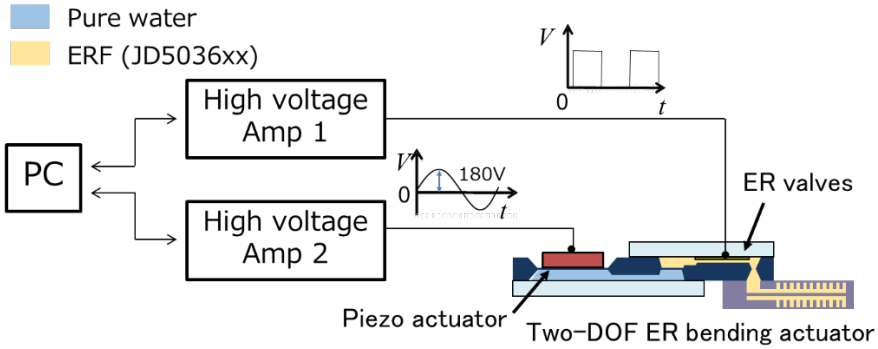


Fig. 5.53 Experimental apparatus for 2DOF ER bending actuator system driven by alternating pressure

5.5　結言

本章では，交流圧力源を含めたシステム全体のマイクロサイズでの試作および多自由度アクチュエータシステムの構築のために，2 自由度 ER 屈曲アクチュエータシステムの実現を目的として各部の試作，特性実験を行った．第 4 章で開発した PDMS 成形プロセスを用いて可動部長さ 1.9mm の 2 自由度 PDMS 屈曲アクチュエータ部を試作し，空気圧試験により垂直方向に 1.1mm，水平方向に 0.7mm の 2 自由度動作が確認した．また，交流圧力源と ER マイクロバルブを 1 チップ上に搭載したシリコン流体チップを試作し，そのマイクロ交流圧力源の特性を実験的に解明した．さらに，2 自由度 PDMS アクチュエータ部とシリコン流体チップによって 1 チップ上に交流圧力駆動 2 自由度 ER 屈曲アクチュエータシステムを構築し，ERF を動作流体とした駆動実験を行い，その特性の一部の解明を行った．

第 6 章　結論

6.1　本論文のまとめ

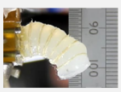
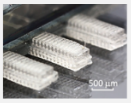
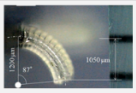
本論文では，微小領域で作業を行う多自由度マイクロシステムへの応用を目的として，電界印加によって見かけの粘度が上昇する機能性流体 ERF を動作流体とし交流圧力システムを適用することでパワー損失の低減とマイクロ化を可能とする交流圧力駆動 ER マイクロアクチュエータシステムを提案，開発した．動作原理のラージモデルによる検証，MEMS 技術を用いた製作プロセスの提案，開発を行い，実験用デバイスとして 1 自由度および 2 自由度 ER 屈曲アクチュエータシステムをそれぞれ構築してその特性を評価した．本論文の ER アクチュエータ開発について表 6.1 にまとめて示す．各章で得られた結論を以下に示す．

第 1 章「緒論」では，小径管路内や人体内などの閉鎖的な微小空間内で用いられる産業用，医療用のデバイスにおける液圧マイクロアクチュエータシステムの利点と課題について述べ，特にマイクロ化とパワー損失の課題解決のため，機能性流体 ERF を用いた新動作原理の液圧マイクロアクチュエータシステムの提案，開発を本論文の目的とした．

第 2 章「交流圧力源駆動多自由度 ER マイクロアクチュエータシステムの提案」では，機能性流体 ERF を用いた新動作原理の液圧マイクロアクチュエータシステムの提案を行った．

液圧制御バルブのマイクロ化のために，機能性流体 ERF の一種であるネマティック液晶を動作流体として用いることで，流路に電極を設けたシンプルな構造によって流体制御が可能となり，分散粒子を含まないため流路の閉塞，電極の摩耗などが発生しないことにより液圧制御バルブのマイクロ化が実現されることを示し，ERF を動作流体とした制御バルブである ER マイクロバルブの基本

Table 6.1 Summary of ER bending actuators driven by alternating pressure

Name	Fabrication	Size of actuator part [mm] (with side silhouette)	Stroke	Note
Large model of 1-DOF ER bending actuator	Conventional machining	7.6x4.6x11	 **17mm** with working fluid of ERF	The **Working principle** of the ER bending actuator system was verified.
1-DOF ER bending actuator	MEMS fabrication	 - 0.5x0.54x1.6	 **2.2 mm** with working fluid of ERF	**Miniaturization using MEMS fabrication** was realized.
2-DOF ER bending actuator	MEMS fabrication	- 0.38x0.42x1.9	**1.4 mm** with working fluid of air	**Multi-DOF** actuator motion was realized.

的な特性について数式を交えて示した. 従来の ER マイクロアクチュエータシステムについて説明しその課題点を明らかにした後に，提案する交流圧力駆動 ER マイクロアクチュエータシステムの動作原理と利点を述べた．提案するシステムは交流圧力システムを適用し機能性流体 ERF を動作流体として用いることで, パワー損失を低減させ, マイクロサイズで構築可能であること, 構造的に MEMS 微細加工が適用しやすいことなどを示した．提案したシステムの一種である交流圧力駆動 ER 屈曲アクチュエータシステムについて説明し, 簡易モデルを用いた理論解析に基づき，その実現可能性を示した.

第 3 章「ラージモデルによる動作原理検証」では，第 2 章で提案した交流圧力駆動 ER 屈曲アクチュエータシステムのラージモデルを試作し, 特性実験を行うことにより動作原理の検証を行った.

提案する交流圧力駆動 ER 屈曲アクチュエータシステムの構成要素である交流圧力源，ER バルブ，ER 屈曲アクチュエータのラージモデルを NC 工作機械による機械加工によって製作した．試作した ER バルブについては，従来の ER マイクロバルブと同等の静特性を有することを特性実験により確認した.

試作したラージモデルを用いて動作原理検証を行った．ボイスコイルモータを駆動源とした交流圧力源から供給される全振幅 110kPa の交流圧力と ER バルブへの全振幅 750V の方形波電圧印加を同期させることにより，可動部長さ 11 mm のシリコーンゴム製流体アクチュエータ部を有する ER 屈曲アクチュエータラージモデルを用いた特性実験で上下方向にそれぞれ 7mm，10mm の先端変位が出力されることを示し，提案したシステムの動作原理の妥当性を明らかにした．また，多自由度システムとして ER アクチュエータラージモデル 2 個を用いた ER グリッパを構築し，その動作を確認した．その結果，提案する交流圧力駆動 ER 屈曲アクチュエータシステムが管内検査マイクロロボットのような多自由度システムに適用可能であることを実証した.

第 4 章「MEMS 技術を用いた 1 自由度 ER 屈曲アクチュエータの試作と特性実験」では，第 3 章で動作原理の検証を行った交流圧力駆動 ER 屈曲アクチュエータシステムのマイクロ化の実現のために，MEMS 技術を用いた 1 自由度 ER 屈曲アクチュエータの実現を図った.

MEMS 微細加工に適合する高性能な屈曲形流体アクチュエータの実現のために, 高アスペクト比構造を有する PDMS アクチュエータ部を FEM 解析に基づいて設計した. PDMS の高アスペクト比 3 次元構造を実現するために新たな PDMS 成形プロセスを開発し, 可動部長 1.6 mm の PDMS アクチュエータ部を試作した.

ER マイクロバルブのマイクロ化のために高粘度 ERF の選定を行い, 低分子ネ

マティック液晶 JD-5036XX を選定した. ER マイクロバルブはシリコン異方性エッチングにより微細加工したシリコン流路部と電極付きガラスを陽極接合することにより試作した.

1 自由度 ER 屈曲アクチュエータを陽極接合と表面改質を用いて組み立て，静特性と動特性について実験を行うことで，上下両方向への 1.1mm の屈曲変位，87°に至る屈曲角度(曲率半径:1.2 mm) を立ち上がり時間 1.1s で達成し，マイクロロボットへの応用可能性を示した.

第 5 章「2 自由度 ER 屈曲アクチュエータシステムの試作と特性実験」では，交流圧力源を含めたシステム全体のマイクロサイズでの試作および多自由度アクチュエータシステムの構築のために，2 自由度 ER 屈曲アクチュエータシステムの実現を図った.

開発した PDMS 成形プロセスを用いて可動部長さ 1.9mm の 2 自由度 PDMS 屈曲アクチュエータ部を試作し，空気圧試験により垂直方向に 1.1mm，水平方向に 0.7mm の 2 自由度動作を確認した．また，マイクロ交流圧力源と ER マイクロバルブを 1 チップ上に搭載したシリコン流体チップを試作し，そのマイクロ交流圧力源の特性について実験的に検証した．また，2 自由度 PDMS アクチュエータ部とシリコン流体チップによって 1 チップ上に交流圧力駆動 2 自由度 ER 屈曲アクチュエータシステムを構築し，ERF を動作流体とした特性実験を行い，評価を行った.

6.2　今後の課題

1.　小径管内移動マイクロロボットの開発

交流圧力駆動 ER 屈曲アクチュエータシステムは, 管内検査用マイクロロボットの移動機構やマイクログリッパなどへの応用が考えられるが，本論文では応用部分について詳細に検討できていない．しかし，2 自由度動作を出力するアクチュエータは開発済みであり，この 2 自由度動作を利用して様々な応用が考えられる．2 自由度動作でその先端部に楕円軌道を描かせることが可能となり，その動作を用いて平地の歩行などを行わせることができる．また，開発した PDMS 成形プロセスによる様々な構造を有するマイクロ流体部品の試作が可能であるため，ものを掴んで，ひねりを加えて，3 次元的に動かすことができるような液圧アクチュエータも一括でウエハ上に製作することができる．これらの高度な作業を実現できるように ER アクチュエータシステムのさらなる開発が必要である.

小径管内移動マイクロロボットの実現にあたって，エネルギー効率は非常に重要な評価指標の一つであるが, 本論文内では交流圧力駆動 ER マイクロアクチ

ュエータシステムの高いエネルギー効率の実現可能性を示したのみで，実際に試作したシステムのエネルギー効率の測定などは未だ行えていない．見かけの粘度変化がより大きな ERF の探索や，流体回路の共振を用いた配管部のインピーダンス低減による圧力損失低減などがエネルギー効率を高める方法として考えられ, 今後開発されるシステムにおいては高効率化と共に ER マイクロアクチュエータシステムのエネルギー効率の測定について試行していく必要がある．

特性実験用の実験デバイスとして試作した交流圧力駆動 2 自由度 ER 屈曲アクチュエータシステムにおいて，その大半の面積はマイクロ流体チップが占めており，さらにそのチップの面積は主に，マイクロ交流圧力源と圧力伝達部，ER マイクロバルブが占めている．小径管内移動マイクロロボットの実現のためにはマイクロ流体チップの小形化が要求される．これら各要素はさらなる最適化によってマイクロサイズでの実現は可能であり，例えば，マイクロ交流圧力源は，現状市販の圧電バイモルフアクチュエータを使用しているが，その形状をマイクロ交流圧力源として最適な寸法に設計することができればその占有面積を減少させることが可能である．また圧力伝達部は，現状，圧力伝達の際のダイアフラム部における圧力損失を低減するために，その厚さ約 5μm に対して直径 1.2mm となるように試作しているが，ダイアフラム厚さをさらに薄くすることができれば，その直径を減少させることも可能となる．さらに，ER マイクロバルブ部においては，さらなる高粘度の ERF を使用することによる ER バルブの流路の短縮が考えられる．GERF(Giant ElectroRheological Fluid)[38,39]は nm サイズの粒子が絶縁液体中に分散している分散系 ERF の一種であり，非常に高い基底粘度と大きな見かけの粘度変化率を特徴とする．著しく大きな基底粘度を有しているため，従来の液圧マイクロアクチュエータシステムで動作流体として使用すると配管部での大きな圧力損失が発生して，システムの有効な動作はおおよそ期待できない．しかし，交流圧力システムの場合は動作流体の最適配置が可能であり，配管部の GERF を水などの低粘度液体に置換すれば配管部での圧力損失問題は解決され，GERF の高粘度と大きな粘度変化率を ER マイクロバルブ部のみで利用することができる．そのため，GERF の交流圧力駆動 ER マイクロアクチュエータシステムへの使用も含めて，高粘度 ERF についての検討を進めていくことが有効であると考えられる．

2.　高性能化のための圧力－流量変換機構の実現

提案した交流圧力システム独自の機構として圧力－流量変換機構について第 2 章でその構造と利点を説明したが，実現はまだされていない．圧力－流量変換機構を実現すると，例えば液圧配管部においては高圧・低流量として圧力損失を低減させてエネルギー効率の改善が見込まれ，また例えば圧電アクチュエー

タからの高発生力を伴う微小変位を圧力－流量変換機構に通すことで，所望の変位と発生力に変換することができる．その圧力－流量変換機構のマイクロ化に適合する製作手法はいまだ開発されておらず，実現が期待される．

3.　アクチュエータシステムの制御法の確立

本論文では交流圧力の ER マイクロバルブによる整流によって交流圧力駆動 ER 屈曲アクチュエータシステムを駆動させていたが, 各種制御手法(フィードバック，PWM，etc.)の適用は行えていない．開発したアクチュエータシステムは，その製作プロセスが MEMS 微細加工を基本としているため，MEMS センサを各部に構築することが容易である．そのため，MEMS センサの組み込みによって圧力や温度などシステムの状態を取得できるようにし，アクチュエータ動作のフィードバック制御を行うことが必要である．また，フィードバック制御が可能となれば，液圧屈曲アクチュエータ部のコンプライアンス制御も可能である．

例えば，ER 屈曲アクチュエータを用いて負荷を駆動する場合，アクチュエータと負荷が接触して反力を受ける際のアクチュエータ液圧室の変形により，アクチュエータの内圧が変化する．この内圧の変化を MEMS 圧力センサで，流入流量を MEMS 流量センサでセンシングし，フィードバックを行い ER マイクロバルブで圧力制御を行うことでコンプライアンス制御が可能であると考えられる．

さらに，1 自由度 ER 屈曲アクチュエータの場合，その液圧アクチュエータ部は 2 個の液圧チャンバを有しておりその両方の内圧を ER マイクロバルブにより制御することでフィードフォワード制御としてのコンプライアンス制御も可能となる．この場合，2 個の液圧チャンバ両方へ流入させる ERF を確保するためにアキュムレータ機構をシステムに組み込む必要があるが，ER マイクロ流体チップ上にシリコンダイアフラムを有する液圧室を追加することでアキュムレータを構築することは可能である．

4.　交流圧力駆動 ER 屈曲アクチュエータシステムの高応答化

交流圧力源を用いた ER 屈曲アクチュエータシステムの性能向上には圧力源の駆動周波数を高める方法と，ER マイクロバルブの流路抵抗を小さくして交流圧力 1 周期あたりの流量を大きくする方法の 2 種類が考えられる．交流圧力を応用したアクチュエータシステムには，交流圧力に起因して液圧屈曲アクチュエータ部に微小振動が常時発生する．そのため，流路抵抗を低減する方法については 1 周期あたりの流量増大に伴いその微小振動が大きくなり，極限的にはアクチュエータとして機能しなくなることが考えられる．一方，駆動周波数の高周波化によって 1 周期あたりの流量は減少していくため，周波数を高める方法は液圧アクチュエータ部に常時発生する微小振動を抑制する方向に作用する．さらに，第 5 章で試作したシステムのマイクロ交流圧力源の駆動源として圧電アクチュエータを用いていたが，理想的にはこの圧電アクチュエータは共振周

波数で駆動されることが高出力化にとって望ましい．しかし本研究では，ER マイクロバルブのバンド幅に制限される形で駆動周波数を 20Hz 程度に設定していた．そのため，今後，ER マイクロバルブの高周波化が必要であり，①ER マイクロバルブのマイクロ流路部の構造の検討と②高い応答性を有する ERF の探索が考えられる．①については，これまでバルブ部には平滑な流路を用いてきたが，DRIE などで形成される超微細構造を有するマイクロ流路を用いた ER マイクロバルブの検討を行うことが考えられる．また，②についても，材料の観点から調査していく必要がある．

付録 A　交流圧力源ラージモデルの試作

動作原理検証用の交流圧力源ラージモデルの概要と実際に試作したものを図 A.1 に示す．本圧力源はボイスコイルモータにより直動軸をプランジャとし往復動させることによって正弦波交流圧力を発生させるものである．駆動源としてのボイスコイルモータの選定においては，ER バルブに電圧を印加した時の弁差圧の立ち上がり時間 20ms に追従できる応答性があるということと，ポンピングによって各アクチュエータに 0.1MPa 程度の振幅の圧力を供給できるということの 2 点を考慮した結果，Akribis Systems 製，AVM20-10-C6.3 を使用することにした．今回使用するボイスコイルモータの概要図を図 A.2 に，仕様を表 A.1 に示す．ボイスコイルモータに直流電流を入力したときに 155℃において定常的に発生可能な最大の力を F_{155} は 2.18N，コイルばねの初張力 F_{s0} を 0.13N，ばね定数 k_{spring} を 0.020N/mm，シリコーンチューブのばね定数 k_{silicone} を 0.02N/mm とすると，交流圧力源の軸部の直径 d を 2.4mm にすることで交流圧力源が定常的に発生可能な最大圧力 $P_{\max}$ はチューブを含めた軸部の断面積 A が

$$A = \frac{\pi}{4} d^2 = \frac{\pi}{4} 2.4^2 = 4.52\mathrm{mm}^2$$

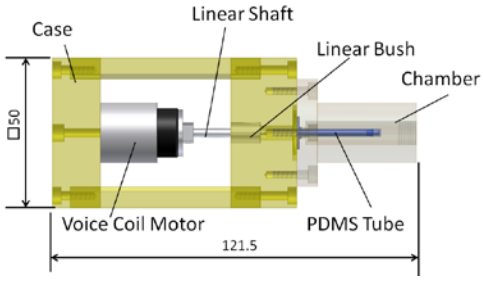
となるため，軸をΔx=10mm 伸ばした状態において

$$P_{\max} = \frac{F_{155} - F_{s0} - (k_{spring} + k_{silione})\Delta x}{A} = 0.37\mathrm{MPa}$$

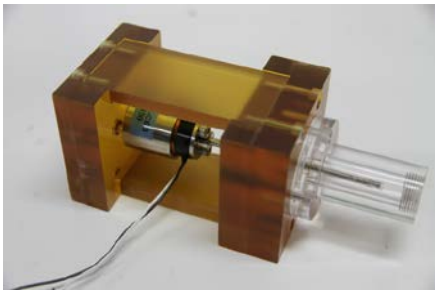
となり，圧力源からアクチュエータまでの管路で圧力損失が生じて，交流圧力源から供給される圧力が減少したとしてもアクチュエータには振幅 0.1MPa 以上の正弦波状の圧力を十分に供給可能である．交流圧力源を周波数 f=10Hz，ストロークΔx =10mm で動作させたとき，吐出される流量の平均値 Q は

$$Q = A \cdot \Delta x \cdot f = 452\mathrm{mm}^3/\mathrm{s}$$

となる．他の 1/2 周期で同一の平均流量の吸入を行うことになる．



(a) Drawing



(b)Photocopy

Fig. A.1 Schematics of alternating-pressure source

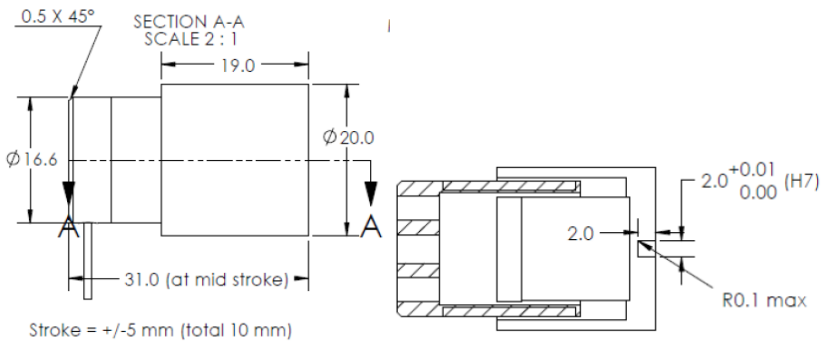


Fig. A.2 Schematics of voice coil motor AVM20-10-C6.3

Table A.1 Voice coil motor AVM20-10-C6.3 property

Parameters	Units	Value
Stroke	mm	10
Force sensitivity(at mid stroke)	N/A	2.00
Continuous force (at 100℃)	N	1.56
Continuous force (at 155℃)	N	2.18
Peak force	N	7.6
Continuous current (at 100℃)	A	0.78
Resistance	Ω	3.5
Inductance	mH	0.40
Continuous current (at 155℃)	A	1.09
Peak current	A	3.8
Electrical time constant	ms	0.1
Mechanical time constant	ms	7.7
Power at peak force	W	50.5
Max coil temperature	℃	155
Coil assembly mass	g	8.8
Core assembly mass	g	30.3

<u>シリコーンチューブの試作</u>

交流圧力源に用いるシリコーンゴム製チューブの概略図を図 A.3 に示す．シリコーンチューブは外径 2.4mm，長さ 26mm，肉厚 0.2mm を有し，シリコーンゴム（主剤 KE-1316（信越化学工業株式会社），硬化剤 CAT-1316（信越化学工

業株式会社)，および RTV シンナー）を用いている．肉厚 0.1mm，0.2mm のチューブを製作して伸縮させたところ，肉厚 0.2mm の場合に 0.3MPa 印加した状態で伸縮させても破れなかったため，肉厚は 0.2mm とした．また，今回使用する ボイスコイルモータの最大ストロークが 10mm であり，シリコーンゴムの薄膜が破断しないように十分に余裕をもたせるためにチューブの長さを 26mm とした．また，肉厚 0.20 mm のチューブをより簡単に軸に装着するために，図 A.4 に示すように肉厚 3mm，長さ 2.2 mm のフランジを設けて，フランジ部を押さえつけることによりシールを行う．

シリコーンチューブの製作プロセスについて以下に示す．

(a) 図 A.4 に示す各鋳型に攪拌脱泡した混合液(主材，硬化剤，および RTV シンナーを 10:1:3 で混合したもの)を満たし, 40 分間真空引きを行う．

(b) 気泡が混入しないように鋳型を組み合わせ,90℃で 90 分加熱し硬化させる．

(c) 鋳型を分解し,型からチューブを取り外し，エタノールで洗浄する．

実際に試作したシリコーンチューブを図 A.5 に示す．チューブの先端部から 15mm の位置の断面を観察し肉厚を測定すると最薄部の肉厚は 0.19mm，最厚部では 0.24 mm で設計値 0.2mm とのずれは最大 0.04mm だった．

シリコーンチューブを直動軸に取り付ける際には機械加工によって製作したポリエーテルイミド(クオドラントポリペンコジャパン株式会社製 UL-1000)のキャップを用いる．図 A.6(a) のようにシリコーンチューブとポリエーテルイミドキャップを軸部に装着しチューブとポリエーテルイミドキャップと直動軸先端をアラルダイトラピッド(ハンツマン・ジャパン株式会社，以下エポキシ接着剤と呼ぶ)で接着する．コイルばねは図 A.6 (a)に示すように直動軸に固定している．シリコーンチューブを直動軸に取り付けた写真を図 A.6 (b)に示す．

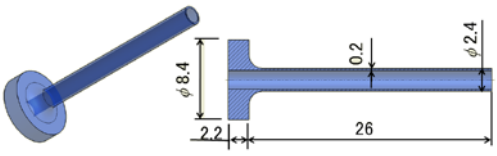


Fig. A.3 Schematics of PDMS tube

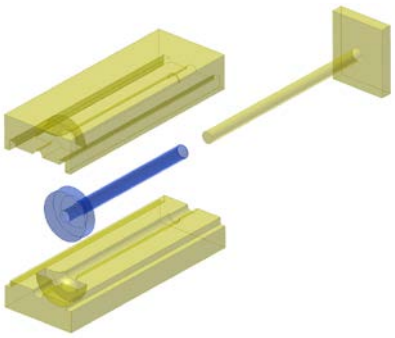
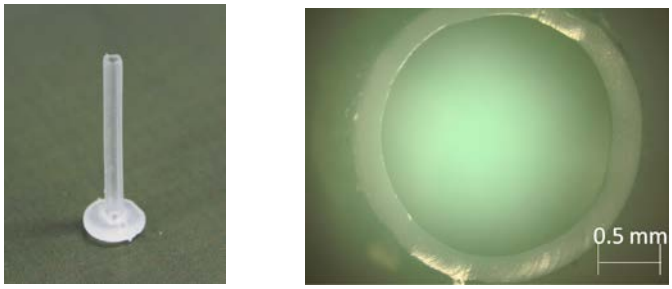
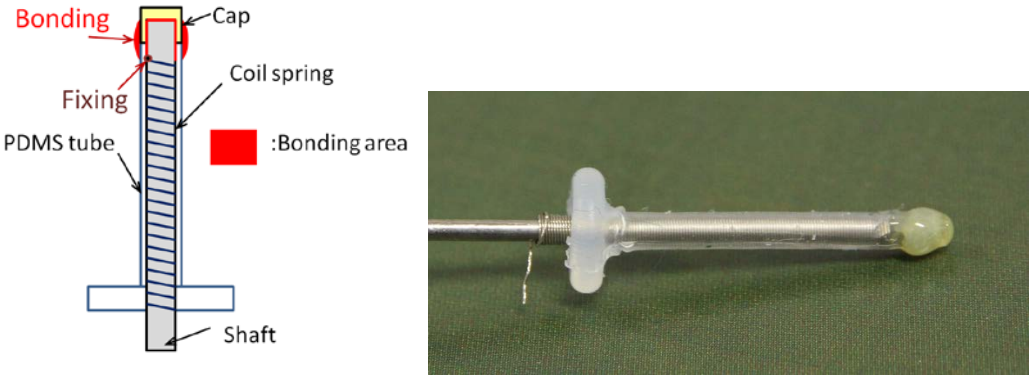


Fig. A.4 Apparatus for molding PDMS tube



(a) Overall view (b) Cross section

Fig. A.5 Photocopy of PDMS tube



(a) Bonding area (b) Photocopy

Fig. A.6 Assembly of PDMS tube

<u>電圧-電流変換回路</u>

交流圧力源に用いているボイスコイルモータは，そのコイルに流れる電流に比例して推力を発生させるアクチュエータである．よって，交流圧力源によって発生する正弦波状の圧力を PC から DA 変換した電圧値によって制御するために入力電圧に比例して電流を出力する電圧-電流変換回路を製作した．製作した電圧-電流変換回路の回路図を図 A.7 に，実際に製作した回路の写真を図 A.8 に示す．回路設計では入力電圧 V_{IN} と出力電流 I_{OUT} の関係が

$$I_{\mathrm{OUT}} = -\frac{R_2}{R_1 R_3} V_{\mathrm{IN}} = -0.315 \cdot V_{\mathrm{IN}}\,[\mathrm{A}]$$

となるように設計を行った．実際の回路に電圧 V_{IN} を入力したときの出力電流 I_{OUT} の値を測定したグラフを図 A.9 に示す．測定では電源電圧 V_{CC}＝15V，$-V_{EE}$=-15V とし，負荷抵抗 R_L=3.9Ωとした．実際の回路では

$$I_{\mathrm{OUT}} = -0.310 \cdot V_{\mathrm{IN}} - 0.00017\,[\mathrm{A}]$$

となり, -0.17mA のオフセットが生じていて, 式(3.5)中の比例係数は -0.310A/V となっており設計値-0.315A/V よりも少し小さくなった． PC からの最大入力電圧V_{MAX} ＝5V に対して，最大出力電流I_{MAX}は

$$I_{\mathrm{MAX}} = -0.310 \cdot V_{\mathrm{MAX}} - 0.00017 = -1.55\ [\mathrm{A}]$$

となり表 A.1 のボイスコイルモータ 155℃における定格電流 1.09A よりも大きく，オフセット電流-0.17mA は最大出力電流と比較して十分小さく，さらに図 A.8 から負荷抵抗 3.9 Ωにおいて十分な線形性をもっていることが確認されたため，今回製作した電圧-電流変換回路は巻き線抵抗3.5 Ωのボイスコイルモータを駆動可能だと考えられる．

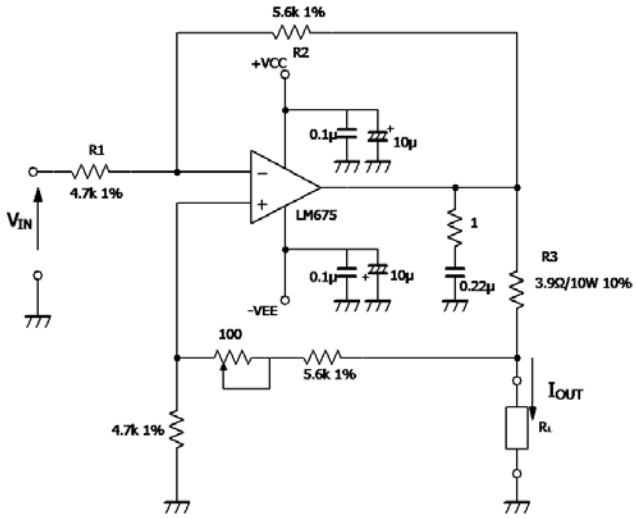


Fig. A.7 Voltage-current conversion circuit

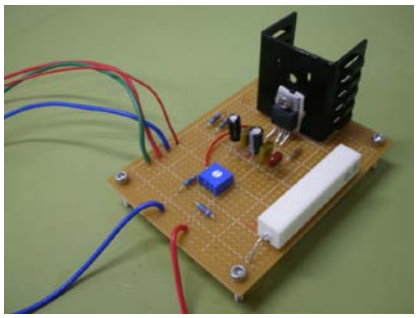


Fig. A.8 Photocopy of the circuit

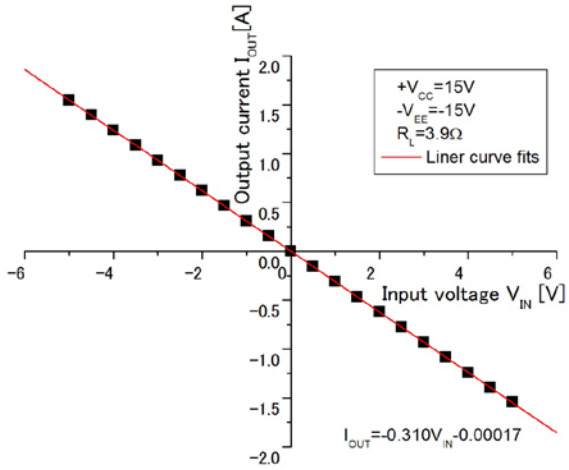


Fig. A.9 Output current versus input voltage

参考文献

(1) M. Takeda, Applications of MEMS to industrial inspection, 14th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, (2001), 182-191.

(2) J. Lim, H. Park, J. An, Y. S. Hong, B. Kim, B. J. Yi, One pneumatic line based inchworm-like micro robot for half-inch pipe inspection, Mechatronics 18, (2008), 315-322.

(3) A. Kuwada, S. Wakimoto, K. Suzumori, Y. Adomi, Automatic pipe negotiation control for snake-like robot, Proc. 2008 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, (2008), 558-563.

(4) Z. Yu-Xia, H. Guang-Ping G. De-Wen, Micro in-pipe robot mechanical structure design of shape memory alloy driving, Proc. 2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, (2009), 360-365.

(5) K. Yoshida, K. Takahashi, S. Yokota, An in-pipe mobile micromachine using fluid power, JSME International Journal B 43 (1), (2000), 29-34.

(6) K. Yoshida and S. Yokota, Study on high-power micro-actuator using fluid power, Preprints of the 6th International Conference on Flow Measurement, Seoul, Korea, Vol. 1 (1993), 122-130

(7) 吉田 和弘，機能性流体の応用事例：次世代フルードパワーシステムを目指して，フルードパワーシステム学会誌，第 45 巻，第 4 号，2014 年 7 月

(8) K. Yoshida, K. Kamiyama, J.-W. Kim, S. Yokota, An intelligent microactuator robust against disturbance using electro-theological fluid. Sensors and Actuators A 175, (2012), 101-107.

(9) K. Yoshida, T. Anzai, J.-w. Kim and S. Yokota: A MICRO MIBILE HYDRAULIC SYSTEM USING ELECTRO-RHEOLOGICAL FLUID, Proc. Of 8th JFPS Int. Symp. on Fluid Power, Okinawa 2011, p. 471-476 (2011)

(10) J.-W. Kim, K. Yoshida, K. Kouda, S. Yokota, A flexible electro-rheological microvalve (FERV) based on SU-8 cantilever structures and its application to microactuators, Sensors and Actuators A 156 (2), (2009), 366-372.

(11) A. Kitagawa, S. Jing, C. Liu, H. Tsukagoshi, A study on a sound operated valve for a wearable pneumatic system, Proceedings of the 7th JFPS International Symposium on Fluid Power, Toyama 2008, (2008), 433-438

(12) Y. Nishioka, K. Suzumori, T. Kanda, S. Wakimoto, Multiplex pneumatic control method for multi-drive system, Sensors and Actuators A 164, (2010), 88-94.

(13) T. Miyoshi, K. Yoshida, S.I. Eom and S. Yokota, “Proposal of a multiple ER microactuator system using an alternating pressure source”, Sensors and Actuators A: Physical, vol. 222 (2015), pp. 167-175.

(14) 小山清人，電気粘性(ER)流体の開発，シーエムシー，(1999)，134-136.

(15) K. Negita, C. Kawano, and K. Moriya, Rheological properties in discotic liquid crystalline phases of 2, 3, 7, 8, 12, 13-hexa(n-tetradecanoyloxy)truxene, PHYSICAL REVIEW E 70, 021702 (2004)

(16) J. A. Reyes, O. Manero and R. F. Rodriguez, Electrorheology of nematic liquid crystals in uniform shear flow, Rheol. Acta 40, 2001, 426–33

(17) J. T. Gleeson and W. van Saarloos, Propagation of excitations induced by shear flow in nematic liquid crystals, Phys. Rev. A 44, 1991, 2588–95

(18) M. De Volder, K. Yoshida, S. Yokota and D. Reynaerts, The use of liquid crystals as electrorheological fluids in microsystems: model and measurements, J. of Micromech. Microeng., vol. 16, 2006, 612-619.

(19) 吉田和弘，朴重濠，高取宏樹，横田眞一：均一系 ER 流体を作動流体としたマイクロバルブ，日本機械学会論文集，66-649，C(2000), 3093-3099

(20) K. Yoshida, M. Kikuchi, J.-H. Park and S. Yokota, Fabrication of Micro Electro-Rheological Valves (ER Valves) by Micromachining and Experiments, Sensors and Actuators A, vol. 95, 2002, 227-233.

(21) J.-W. Kim, K. Yoshida, K. Kouda, S. Yokota, A flexible electro-rheological microvalve (FERV) based on SU-8 cantilever structures and its application to microactuators, Sensors and Actuators A: Physical, vol. 156, 2009, 366-372.

(22) K. Yoshida, H. Yano, J.-H. Park, and S. Yokota, A VALVE-INTEGRATED MICROACTUATOR USING HOMOGENEOUS ELECTRORHEOLOGICAL FLUID, Proc. of Mechatronics 2002, 725-734.

(23) K. Yoshida, T. Anzai, J.-w. Kim and S. Yokota, A Micro Rolling Diaphragm Actuator Equipped with an ER Valve, The 14th International Conference on Mechatronics Technology(ICMT2010), Osaka 2010, 147-151.

(24) K. Yoshida, T. Anzai, J.-w. Kim and S. Yokota, A MICRO MOBILE HYDRAULIC SYSTEM USING ELECTRO-RHEOLOGICAL FLUID, Proc. of the 8th JFPS International Symposium on Fluid Power, Okinawa 2011, 471-476.

(25) 市川常雄，大橋彰，管内交液流による動力伝達の基礎研究，日本機械学会論文集, Vol. 42 (1976) No. 357, 1485-1494.

(26) K. Yoshida, S. Hakoda, S. I. Eom, S. Yokota, An ER Microvalve Having Two-DOF Flexibility, Proc. of the 15th International Conference on Mechatronics Technology (ICMT2011), Mellbourne 2011, 46-49

(27) T. Miyoshi, K. Yoshida, J.-w. Kim, and S.I. Eom, “An MEMS-based multiple electro-rheological bending actuator system with an alternating pressure source”, Sensors and Actuators A: Physical, vol. 245 (2016), pp. 68-75.

(28) M. De Volder and D. Reynaerts, Pneumatic and hydraulic microactuators: a review, J. Microelectromech. Syst., vol. 20, 2010. 18pp.

(29) A. De Greef, P. Lamnert, A. Delchambre, Towards flexible medical instruments: Review of flexible fluidic actuators, Precision Engineering, vol. 33, 2009, 311-321.

(30) O. C. Jeong and S. Konishi, All PDMS Pneumatic Microfinger with Bidirectional Motion and Its Application, J. Micromechanics and Microengineering, vol. 15, 2006, 896-903.

(31) B. Gorissen, T. Chishiro, S. Shimomura, D. Reynaerts, M. De Volder and S. Konishi “Flexible pneumatic twisting actuators and their application to tilting micromirrors”, Sensors and Actuators A: Physical, vol. 216, 2014, 426-431.

(32) J. M. Karlsson, T. Haraldsson, C. F. Carlborg and W. Van der Wijngaart, Low-stress transfer bonding using floatation, J. of Micromech. Microeng., vol. 22, 2002 075005 (6pp).

(33) S. Bhattacharya, A. Datta and J. M. Berg and S. Gangopadhyay, “Studies on surface wettability of poly(dimethyl) siloxane (PDMS) and glass under oxygen-plasma treatment and correlation with bond strength”, J. Microelectromech. Syst., vol. 14, 3, 2005, 590-597.

(34) Yoshida, K., Park, J.-H., Yano, H., Yokota, S. and Yun, S., Study of valve-integrated microactuator using homogeneous electro-rheological fluid, Sensors and Materials, Vol. 17, No. 3 (2005), 97-112.

(35) P. Pal, K. Sato, M. A. Gosalvez, B. Tang, H. Hida and M. Shikida, Fabrication of novel microstructures based on orientation-dependent adsorption of surfactant molecules in a TMAH solution, J. of Micromech. Microeng., vol. 21, 2011, 015008 ,11pp

(36) K. C. Tang, E. Liao, W. L. Ong, J. D. S. Wong, A. Agarwal, R. Nagarajan and L. Yobas, Evaluation of bonding between oxygen plasma treated polydimethyl siloxane and passivated silicon, J. of Physics: Conference Series, vol.34, 2006, 155–161.

(37) K. Yoshida, S. Yamamoto, S. I. Eom and S. Yokota, A Multiple-Microactuator

System Using a High-Frequency Pressure Source, Sensors and Materials, Vol. 27, No. 4, 2015, 317-328.

(38) W. Wen, X. Huang, S. Yang, K. Lu, and P. Sheng, The giant electrorheological effect in suspensions of nanoparticles, nature materials, vol. 2, 2003, 727–730.

(39) X. Gong, J. Wu, X. Huang, W. Wen, and P. Sheng, Influence of liquid phase on nanoparticle-based giant electrorheological fluid, Nanotechnology, Vol. 19, 2008, 165602, 7pp.

謝辞

吉田和弘教授には学部4年生のときから6年間の長きにわたりご指導いただきました．厚く御礼申し上げます．私の研究活動においては吉田先生から多大な裁量をいただけていましたので，非常に楽しくのびやかに研究に打ち込ませていただけました．感謝のことばしかありません．また国際学会への参加や海外の研究所訪問など貴重な経験をいくつもさせていただきました．本当にありがとうございます．

横田眞一名誉教授には学部生のときから5年間ご指導いただきました．深く感謝いたします．横田先生からの的確なご指摘がいただけていたからこそ，今日の私の研究があるのだと信じております．

金俊完准教授には6年間の間熱心にご指導いただきました．深く感謝いたします．金先生の積極的でいてグローバルなご活躍をこれからの研究人生で参考にさせていただきたく思います．

進士忠彦教授，高山俊男准教授，只野耕太郎准教授には，本研究・論文をまとめる上で，貴重なご意見をたくさん頂きました．厚く御礼申し上げます．

嚴祥仁助教には研究に関する様々な問題を解決していただけました．特にパソコン関係のトラブル対処していただいたことは，忘れられません．ありがとうございました．

西岡國生様にはメカノマイクロプロセス室の作業において多大なご助力をいただき，問題の迅速な対応をしていただいておりました．厚く御礼申し上げます．

ソンタン様，原様，増田様，佐藤様，箱田様，山下様，山田様をはじめとした研究室の先輩方には本当にお世話になりました．先輩の皆様がご卒業された後も，様々な形で交流をしていただき，精神的に支えとなりました．

研究室の同期や後輩には，感謝しかありません．私が博士後期課程になってからは，研究室に関する様々な仕事を主に後輩達に頼っていましたので，本当にありがとう．

最後になりましたが，学生の間の生活の精神面，健康面を支えてくれた家族に心より感謝します．

2017 年 2 月 22 日

三好 智也