

平成18、19、20年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「情報家電、医療機器分野に使用する金属材料を主体とした  
マイクロポンプ、マイクロバルブの開発(呼称:MPVプロジェクト)」

## 研究開発成果等報告書

平成21年3月

委託者 関東経済産業局  
委託先 タマティーエルオー株式会社

## 目 次

1	研究開発の背景・目的、目標および研究体制	1
1.1	背景と目的	1
1.2	研究開発の目標	2
2	研究成果概要	4
2.1	システム設計・数値シミュレーション	5
2.2	要素技術の研究開発	8
2.3	ポンプ・バルブ試作	14
3	全体総括	18
3.1	研究開発の成果	18
3.2	今後の課題	19

## 研究開発成果等報告書

### 1 研究開発の背景・目的、目標および研究体制

#### 1.1 背景と目的

近年、MEMS 関連の研究開発が急速な発展を遂げてきた。中でも情報家電に使用するマイクロ燃料電池や生物学や化学分析やマイクロ医療分野への応用に関するものが大きく拡大している。国内外の市場調査結果から、2010 年頃から MEMS 関連商品の市場が大きく伸びると予想される。また、中近東の情勢や中国・インドなどによるエネルギーの大量消費化によって、原油価格の急激な高騰と供給の不安定化が懸念されており、さらなる省エネルギーで高効率な代替エネルギーの実用化が重要となっている。さらに、急速な少子高齢化により、勤労者人口の減少や医療費の増大が懸念されており、低価格でかつ携帯可能な医療器具の研究開発が望まれている。モバイルパソコン、携帯電話などの燃料電池システム、及び医療用薬液注入に使用するマイクロポンプ、マイクロ  $\mu$  バルブ（以下、 $\mu$  ポンプ、 $\mu$  バルブ）などの需要が高く、従来、これらに適した信頼性の高い  $\mu$  ポンプ、 $\mu$  バルブは存在していなかった。このような観点から、小型燃料電池や小型医療用薬液注入システムが世界的に研究・開発されており、特に重要な要素技術である  $\mu$  ポンプ・ $\mu$  バルブの研究開発が盛んになっている。

今まで、 $\mu$  ポンプなどを含む MEMS の加工技術は単結晶シリコン材料などのリソグラフィが主であり、使用する材料の制約が大きく、生産コストも高いなど、多品種少量生産には対応しないなどの問題点がある。また近年、型を用いた成形技術として、シリコン等の基本材料を用いて型による樹脂のナノインプリントや射出成形などがある。しかし、樹脂材料は生化学応用における耐酸性、耐アルカリ性などの要求に対応できず、さらに低ヤング率など剛性、強度も不十分であり、 $\mu$  ポンプの構成材料としては満足できない。今後、MEMS の普及に伴い、安定した MEMS の生産技術の開発が大変重要な課題となる。そのため、低コスト量産技術による信頼性の高い  $\mu$  ポンプ、 $\mu$  バルブの製造が強く求められている。

一方、わが国の主力産業である自動車や家電、半導体などモノづくりの基盤を支えてきた金型産業や金属プレス加工産業は、主要なユーザが中国など海外に生産拠点をシフトしたこと、また、最新設備と低廉な労働コストを武器に中国、韓国による追い上げが加速していることなどからかつてない厳しい環境にさらされている。そこで、MEMS や燃料電池などの超精密電子機械製造の需要に合わせて、金型の微細加工や超精密プレス加工などの技術高度化を行い、かつての圧倒的な国際競争力の復活を目指す必要がある。また、金型を用いた金属材料プレス加工による MEMS などのマイクロ機能デバイスの創成は、金属材料が剛性や強度が高く、耐薬品性や生体適合性も高いなど、大変優れており、さらに材料の延性を利用した成形加工は生産効率が高く、低コストの量産加工技術であることから、今後も MEMS の普及には欠かせない加工技術である。

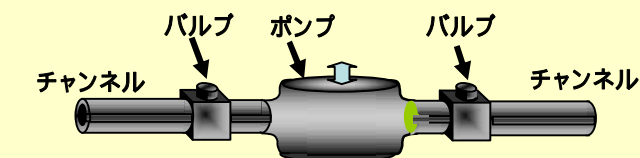
本研究開発事業では、このような背景を踏まえて、情報家電やマイクロ医療への応用が期待されている  $\mu$  ポンプやバルブを金属材料の高精度マイクロプレス成形によって創成することを目的とする。

## 本研究プロジェクトのアプローチ

1. マイクロ金属材料プレス加工技術の高度化
2. 3次元マイクロデバイス設計評価技術
3. マイクロ接合技術，マイクロシーリング技術
4. 自動組立技術



### 医療，情報家電用金属材料マイクロポンプ・バルブを創成



材料:Ti, SUS

製品概念図

#### 1.2 研究開発の目標

$\mu$  ポンプ・バルブは複数部品から構成される機能デバイスだけでなく、液体の輸送を目的としているため、密閉性や開閉部のシール性が大変重要となる。そのため、各部品を加工するための金型の更なる高精度が必要となる。また、圧入やカシメなどの機械的な締結法に加えて、電子ビームを用いたマイクロ接合技術を取り入れ、密閉性の向上を図る。さらに、開閉部のシール性を上げるためには、バルブ材料に対して、適切な剛性設計及び表面特殊めっき処理によるシール性の向上を図る。これらの技術を複合することにより、信頼性の高い金属材料マイクロデバイスの量産システムを開発する。具体的には、マイクロ医療に使用される超微量投薬用  $\mu$  ポンプとバルブの開発、及び情報家電燃料電池用  $\mu$  ポンプとバルブを商品として開発する。

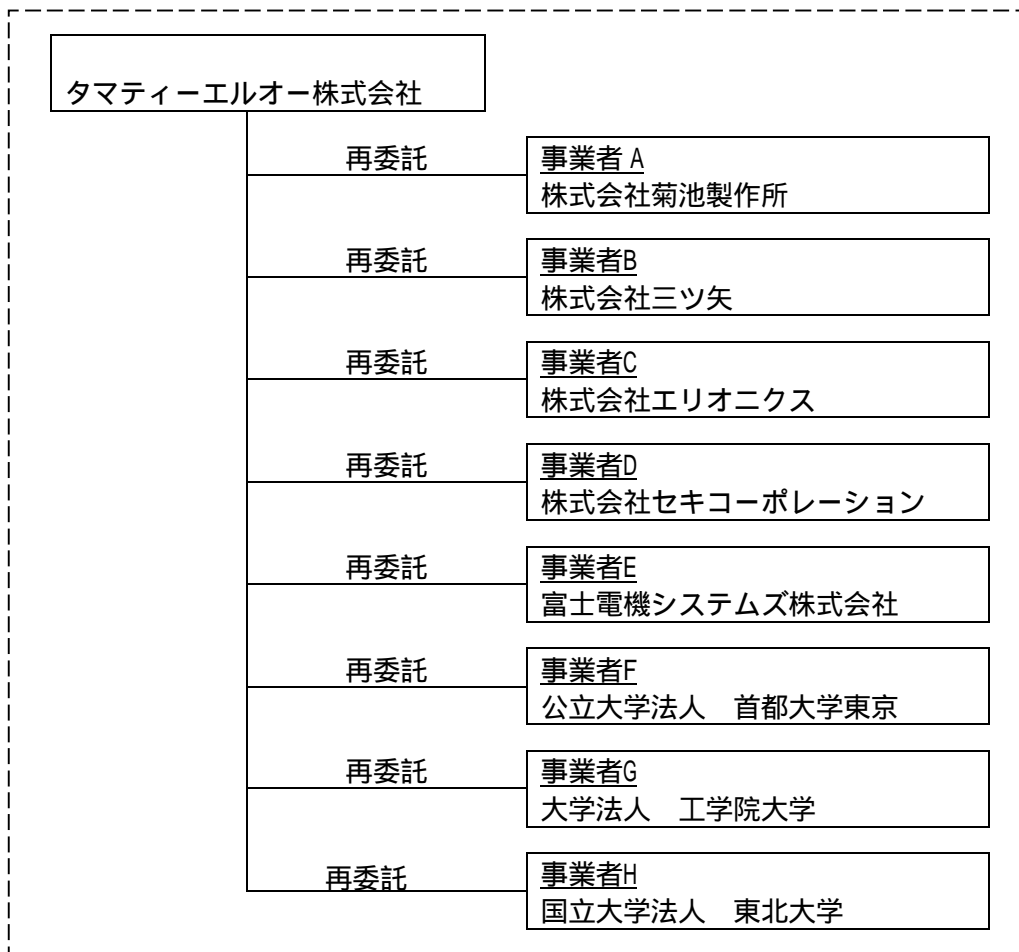
金属板材のプレス、絞り加工および型内組立加工により  $\mu$  ポンプ、 $\mu$  バルブを構築し、量産することを目指す。高精度金型加工、高精度位置合わせにより、漏れのない流量  $0.1\mu\text{l}/\text{min}$  クラスと  $100\sim 200\mu\text{l}/\text{min}$  クラスの  $\mu$  ポンプ、 $\mu$  バルブを実現する。シール性の向上については、特殊めっきによるシール性向上や電子ビームによるマイクロ溶接の開発を行う。

また、技術的目標として、金属プレス技術の高度化、めっきに係わる技術の高度化により、金属材料を用いた  $\mu$  ポンプ、 $\mu$  バルブを試作し、その生産技術も開発する。

### 1.3 研究体制（研究組織、協力者）

#### (1) 研究組織（全体）

総括研究代表者（PL） 公立大学法人首都大学東京大学院 システムデザイン研究科・教授・楊 明	副総括研究代表者（SL） 株式会社菊池製作所 ものづくりメカ トロ研究所・所長・一柳 健
--	--



#### (2) 協力者

氏名	所属・役職
外川 剛	オリンパス(株) 新規中核事業企画本部新事業開発部・事業開発1グループ・課長
椋澤 康成 中野 禅	カシオ計算機(株) 研究開発センター 第四開発部 第41開発室 (独)産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究部門 集積加工研究グループ
森河 和雄	(地独)東京都立産業技術研究センター 研究開発部第二部 先端加工グループ

## 2 研究成果概要

マイクロ金属プレス加工技術の高度化及びマイクロ接合技術マイクロシーリング技術を開発し、複合化することにより、信頼性の高い $\mu$ ポンプ、 $\mu$ バルブを実現することが本プロジェクトの最終目標である。それに対しては、金属材料 $\mu$ ポンプ・バルブの設計とシミュレーション技術の研究開発、機械加工、プレス成形、機能性メッキ、接合などの要素技術の高度化、さらに金属材料バルブ、 $\mu$ ポンプの試作及び試作したマイクロ部品及び組み立てたデバイスの評価を行った。具体的には、以下のような研究成果が得られた。

### (1) システム設計・数値シミュレーション

情報家電用、医療機器用の $\mu$ ポンプ、 $\mu$ バルブのそれぞれの仕様に合わせて、原理の異なるポンプを考案し、その構造を提案した。具体的に、ダイヤフラム駆動に基づく情報家電用大流量ポンプ、及びチューブ型小流量ポンプの二種類のポンプを開発した。加工手法、アセンブリ、寸法精度などの影響因子を考慮して、それぞれの構造を検討し、設計を行った。また、ダイヤフラムのポンプ構造およびバルブ構造に対して有限要素法を用いた数値シミュレーションを行い、デバイスの構造や表面粗さ、表面修飾などによる流れ効率、圧損を評価し、 $\mu$ ポンプ機能に関する理論的な裏付けができた。要求仕様に対するバルブの変形量などの設計指針を示すことができた。今後、これらのシミュレーションを $\mu$ ポンプ・バルブの最適構造設計への適用が期待される。

### (2) 要素技術の研究開発

開発すべき要素技術を a) 機械加工精度の改善とその評価、 b) プレス加工による部品加工・アセンブリの評価と精度改善、 c) めっきによる表面性状の改善とその評価、 d) マイクロ金属材料の電子ビーム溶接最適条件の確立、 e)  $\mu$ ポンプ駆動技術の開発に類別し、各々、所定の成果が得られた。

### (3) ポンプ・バルブ試作と評価

$\mu$ バルブ及び $\mu$ ポンプの部品を要素技術の精密機械加工及び金属薄膜のプレス成形により、製作した。これらの部品を精密にアセンブリし、 $\mu$ バルブ及び $\mu$ ポンプのプロトタイプを製作した。高精度に製作した $\mu$ バルブを用いて、2種類の $\mu$ ポンプを試作した。まず、大流量の仕様に対してはダイヤフラム型ポンプ、小流量の仕様に対してはチューブ型ポンプをそれぞれ試作した。ダイヤフラム型ポンプには、薄膜型 PZT を実装し、矩形波信号で、評価実験を行った。また、チューブ型ポンプは、形状記憶合金及び外部振動による駆動を試みた。何れも要求仕様に満足する流量が得られた。特に、ダイヤフラムポンプの場合は、高い自給性を有し、気泡が混入された場合でも、安定したポンプ特性を得られており、実用化が期待される。

## 2.1 システム設計・数値シミュレーション

$\mu$  ポンプ、 $\mu$  バルブの設計開発に重要な評価シミュレーションの検討を行った。ポンプの圧力損失や漏れなどにとって重要な表面性状の流れに及ぼす影響を調べ、微細粗さを有するマイクロ領域内流れの流動抵抗は、微細粗さ親水性/疎水性に大きく依存することが分かった。

$\mu$  バルブにかかる流体力とバルブの弾性力との釣り合いからバルブの変位量を推定する方法を検討した。試作したバルブは、流量  $10 \sim 100 \mu\text{L}/\text{min}$  では、 $1.7 \sim 3.3 \mu\text{m}$  程度変位することがわかった。得られた流量-変位量を用いて、圧力-流量特性を求めた。流量が増加するに従いバルブの圧力損失は非線形に増加し、実験値との定性的な一致をみた。しかし、計算値の圧力損失は実験値より約 30 倍大きくなるなどの問題がある。

本研究で開発した評価シミュレーション法は、 $\mu$  バルブの設計開発に有用であり、工期の短縮や効率化、ポンプ性能の最適化に貢献できると考えられる。

### 2.1.1 マイクロ流れシミュレーション

---壁面の親水性・疎水性が流れに及ぼす影響---

微細な凹凸を有する壁面内に存在する気相が流動条件下でどのような挙動を示すか解析し、壁面の親水性や疎水性の性質が気液界面変形挙動にどのような影響を及ぼすか明らかにする。図 1 に解析モデルを示す。流路は高さ  $2 \mu\text{m}$  の 2 次元ポアズイユ流れを仮定し、定

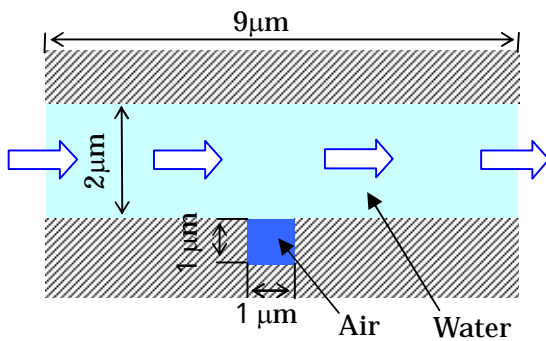


図 1 キャビティ内気相変形モデル

表 1 解析条件

Contact angle	$108^\circ, 60^\circ$
Inlet	10kPa
Outlet	Atmospheric pressure
Reynolds number	0.2
Temperature	293K
Surface tension	0.073N/m
Time step	10 s

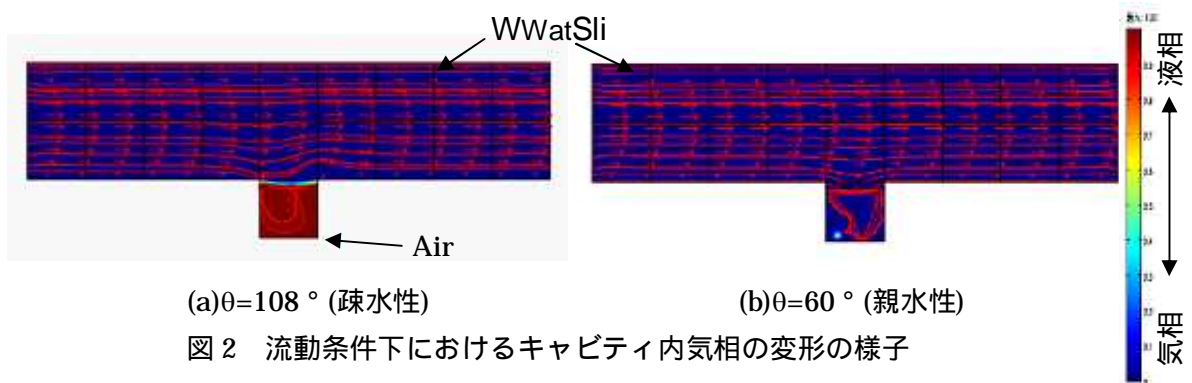


図 2 流動条件下におけるキャビティ内気相の変形の様子

常層流で水が流れているとする。初期条件として、片側壁面にある  $1\mu\text{m}\times 1\mu\text{m}$  のキャビティ内に空気相を設置する。表 1 に解析条件を示す。接触角は疎水性では $\theta=108^\circ$ 、親水性では $\theta=60^\circ$ とし、空気層の変形挙動の解析を行った。

図 2 に解析結果を示す。図中の青色が気相を赤色が液相を示す。青から赤への変化の領域は気液界面を表している(右端コンター図参照)。図 2 より、接触角は気液界面挙動に非常に大きな影響を及ぼすことが分かる。図 2(a)の疎水性 ( $\theta=108^\circ$ ) の場合、流動条件下でも気液界面はほとんど変化せず、キャビティ内に空気が取り残された。また、この気液界面近傍で液体のすべり速度が生じ、若干の流動抵抗低減が見られた。これらの結果は、従来の超はっ水性壁面に関する実験結果と定性的に一致する。一方、図 2(b)の親水性 ( $\theta=60^\circ$ ) の場合、流動条件下ではキャビティ内に気相が存在できなかった。これは毛管現象でキャビティ内に水が浸入し空気が追い出されたためと考えられる。これらの結果から、粗さを有するマイクロスケール流れの流動抵抗を解析するには、親水性壁面では表面粗さの影響を、疎水性壁面では表面粗さよりも気液界面の影響を考慮すれば良いことが分かった。

図 3 に 3 種類の粗さ壁面状の速度分布を滑面壁面の結果とともに示す。図より矩形の流路ではキャビティ部分に渦が確認でき、これが矩形粗さ流路の圧力損失増加の要因と考えられる。しかしながら、三角粗さと正弦波形粗さの間に渦などの明確な違いは見られなかった。一般的に、液体と固体の接触面積が増えれば圧力損失が増大するが、これらの圧力損失の増加は表面積だけでは整理できなかった。これらのことにより表面粗さ、形状、ピッチ、流路表面積のそれぞれのパラメータが複雑圧力損失に影響を与える事がわかった。

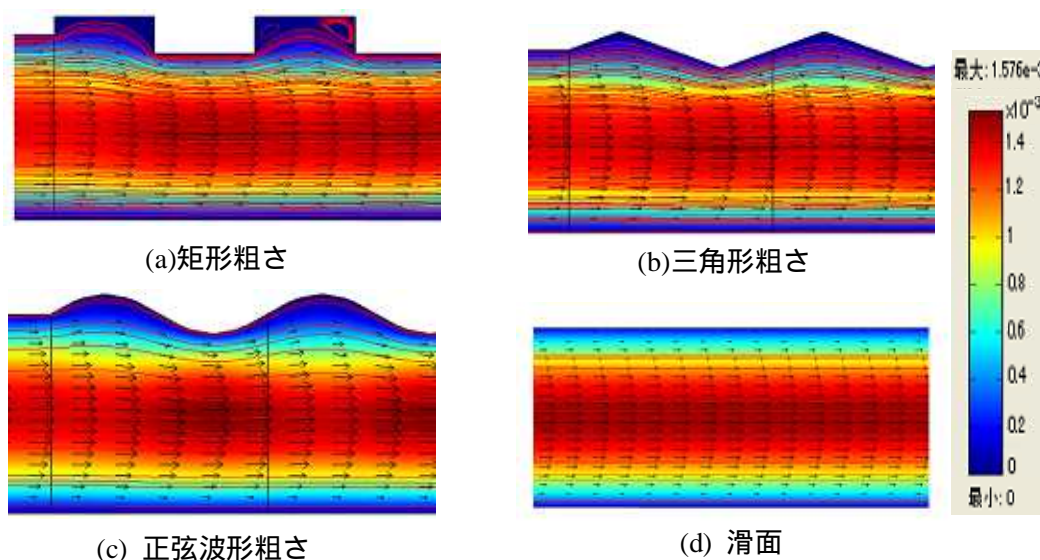


図 3 親水性表面微細粗さ壁面上の速度分布



## 2.1.2 ポンプ・バルブ駆動に関する評価シミュレーション

バルブにかかる力と変位量の関係を知るため、 $\mu$ バルブの構造計算を行った。スリットの外側部分を固定し、バルブ上面に均様な静的な力 1, 3, 10kPa を加え、軸対象モデル、有限要素法を用いてバルブの変位量を求めた。 $\mu$ バルブの形状と計算グリッドを図4に示す。メッシュ分割は外側の固定部分はメッシュ分割を少なくし、変位が大きい中心部分とスリット部分はメッシュを細かくした。総自由度は 95970、総接点数は 5240、シェル要素数は 17161 とした。バルブの物性値としてヤング率  $E = 1.99 \times 10^{11}$  Pa、ポアソン比  $\nu = 0.33$ 、密度  $\rho = 7.85 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup> とした。

図5にバルブの中心に 3kPa の力を加えた場合の変位量分布を示す。変位は中心で最大となり、最大変位量は 0.121 $\mu$ m となった。変位は中心から外側へ行くにつれて小さくなった。バルブにかかる力と変位量の関係調べた結果、バルブ上面に力  $F = 0.02$  N を負荷した場合、スリットの内側部分が 4.86 $\mu$ m 下方に変位した。なお、スリットの内側部分に均様に力を加えているため、バルブの弁は変形せずに平行に変位した。

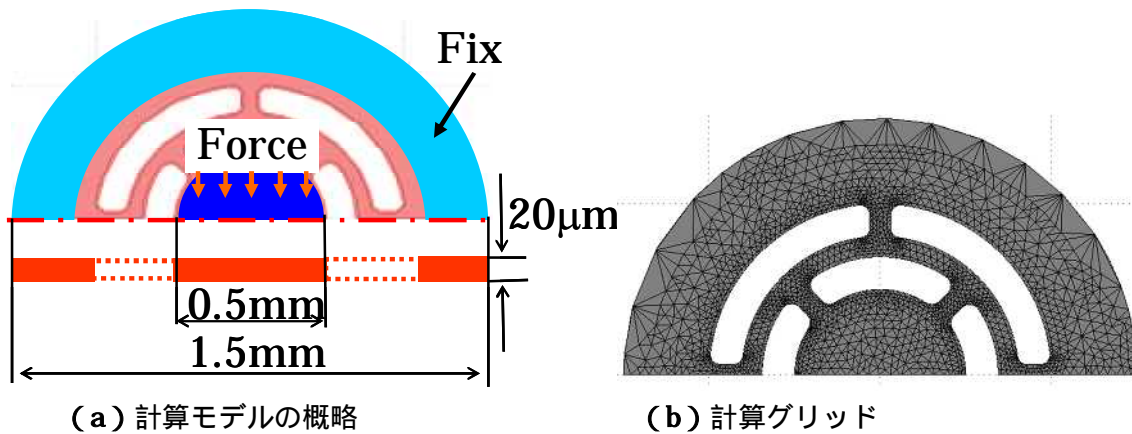


図4 バルブの弾性力の計算

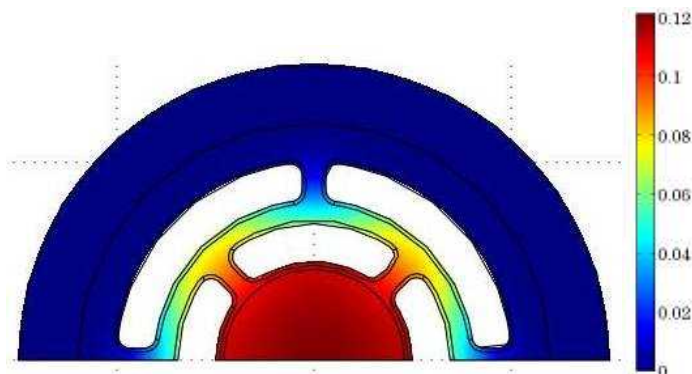


図5 3kPaの力を加えた時のマイクロバルブの変位分布

## 2.2 要素技術の研究開発

MPVの創成に必要な各種要素技術について、研究開発した。具体的には、マイクロ形状創成加工機の導入によるマイクロ部品の高精度機械加工、高精度プレス加工プロセスの研究開発、バルブの表面のシール性を実現する機能性めっきの開発、微小部品のマイクロ溶接技術の開発、さらに $\mu$ ポンプ駆動技術の開発を行った。具体的な研究開発成果を以下に示す。

### 2.2.1 機械加工精度の改善とその評価

$\mu$ バルブ部品の加工を中心に、加工治具の工夫などを行い、表面性状、コーナー半径の制御など加工精度の向上、マイクロ部品の加工条件の最適化を図った。また、 $\mu$ バルブ部品の高精度なアセンブリを実現するための加工方法や構造などを改良することにより、高精度な $\mu$ バルブとポンプの製造を可能にした。

$\mu$ ポンプ・バルブの各部品について製作し、寸法評価を行った、その評価結果について述べる。各部品中、特に寸法精度が重要である「アウトブッシュ」についての寸法評価結果は以下の通りである。

この部品の中にはバルブプレート、インブッシュ等の部品が挿入されるため、図6中のCのR部、並びにBの径の仕上がりは特に重要である。図6中の表にA~C部の寸法計測結果を示すが、B部については設計公差内に収まっており、C部のRについては部品を切断して計測を行い、Rが最小になっていることを確認した。

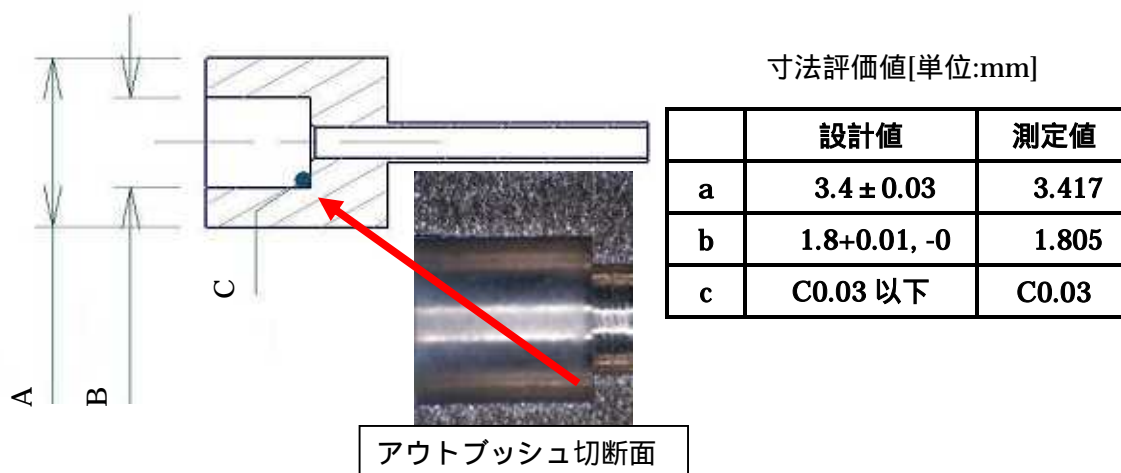


図6 アウトブッシュの寸法評価結果

## 2.2.2 プレス加工による部品加工・アセンブリの評価と精度改善

$\mu$  ポンプ・バルブの中心的な要素部品バルブ部品をプレス加工により創成することを可能にした。機械加工と比較すると、寸法精度、平坦度の向上、表面粗さの低減が実現できた。プレス成形により素材の改質効果も得られた。さらに、バルブプレートとの一体成形の可能性も見出した。

実験装置としては、新たに開発した抜き絞り実験型を用い、プレス機としては株式会社セキコーポレーション製、精密小型卓上サーボスクリュ-プレス機を用いた。その外観写真を図7に示した。本プレス機は、サーボモータ駆動による、より高精度高効率な加工プロセス制御に対応しており、さらに自動材料送り装置を装備し、順送での加工に対応している。その他にも金型の設置等の作業性も改善され、実験の効率も上昇した。

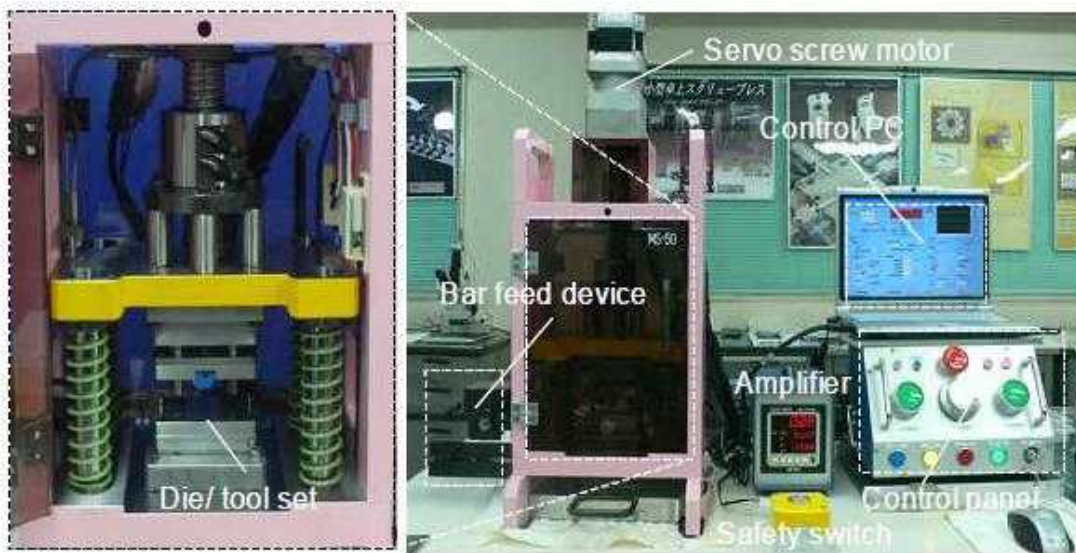
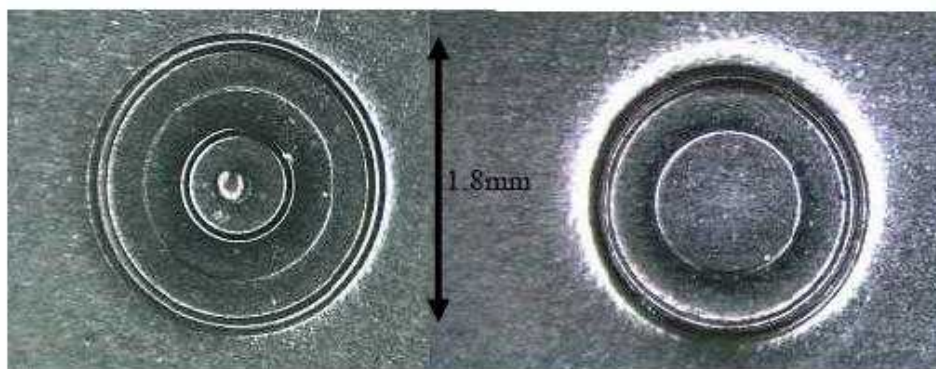


図7 卓上型サーボスクリュ-プレス機械外観



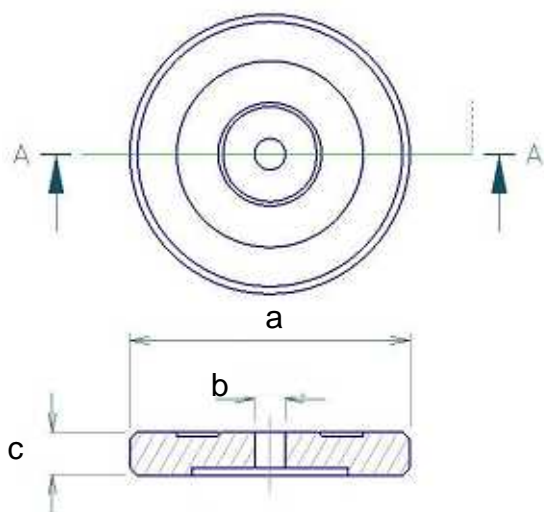
(a) 表面

(b) 裏面

図8 鍛造工程後のインブッシュイメージ

素材初期板厚 0.5mm のチタン板材を鍛造および抜き加工の 2 工程で、インブッシュのプレス成形を行った。鍛造工程終了後の部品イメージを図 8 に示す。鍛造によって、素材表面に溝が形成された。また、材料が流動したことにより、一部中央に隆起した形になっている。表面においても、平滑な金型表面が素材に転写され、その結果、表 2 のように素材表面粗さが低減した。

表 2 インブッシュ主要寸法測定結果



	設計値	測定値
a	1.8 ± 0.01	1.796
b	0.2 ± 0.05	0.205
c	0.28 ± 0.05	0.282

	Max	Min
平坦性	5.5	0.91
表面粗さ	Ra 0.327	

以上の結果より、プレス成形によるインブッシュの創成は精度が高く、加工効率、歩留まり向上にもつながった。特に、マイクロ金属部品の創成において、大きな課題である素材の形状精度や表面粗さに対して、加工プロセス中に改善することが可能であることを示唆し、マイクロプレス加工の有効性が示されている。また、鍛造工程において、インブッシュの微小な隆起部を複数形成し、後工程でバルブプレートとのカシメを行うことによって、金型内で、成形だけでなく、高精度な組立も実現している。これにより、本プロジェクトの目標であるポンプ・バルブの一体成形の実現に大きく前進したと言える。

閑話休題（１）マイクロポンプってなぜ難しいの？：

一円玉より小さい直径 11mm の中に、バルブを 2 つ、ダイヤフラムとその駆動用電気・機械変換メカを入れる必要があります。そのバルブは直径 3.4mm で、中に直径 1.8mm のサブユニット、さらにその中に直径 0.5mm のバルブプレートの弁があって、・・・とマイクロの世界です。各部品に μm 以下の加工精度が必要になります。金型内一体成形は、これらの精度限界克服のブレークスルーとなることが期待されています。半導体の世界でセルフアラインと呼ばれているものに近いと言えます。

### 2.2.3 めっきによる表面性状の改善とその評価

めっき前処理によって、基材表面粗さの改善や基材との接合強度を評価し、めっき前処理条件最適化、及びめっき膜の表面粗さ、硬さの制御を可能なめっき条件の最適化を図った。実際、 $\mu$ バルブの弁とインプッシュにめっきを施し、 $\mu$ バルブのシール性向上を図った。さらに、パルス電圧を用いためっきを施すことにより、めっき結晶粒の成長を抑制することが可能となり、表面粗度の改善の加工性を見出した。

通常チタンにめっき施しても十分な密着性を得ることは難しい。チタンは酸素、窒素との親和力が強いためにチタン表面に生成した酸化皮膜を除去することが重要である。しかしながらエッチングにより酸化皮膜が除去されたチタンは水洗中に不動態膜を形成し、次のめっきの密着性を悪くする。そこで今回は高度な密着を要求される場合であることから、不活性ガス雰囲気中で熱処理を行いめっき膜とチタン素地との拡散層による金属結合を形成させることで密着を確保した。

本プロジェクトの被めっき体は5~20ミクロンと非常に薄く、一般的なめっき法では加工中にストレスで変形する恐れがある。そこで専用治具を作成しめっきを試みた。

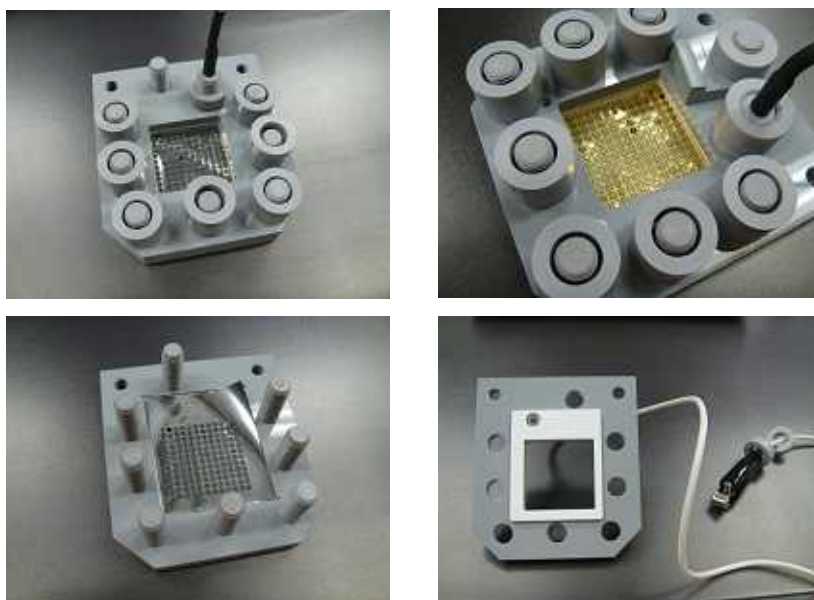


図9 箔材用治具

図9のように箔を縁で固定することでハンドリングや液中の攪拌によるストレスにも耐えることを実現した。また、金のめっき厚さを数カ所測定したところ、狙い厚さ1ミクロンに対して最小0.98ミクロン、最大1.12ミクロンと極めて均一であり、この方法は、均一電着性にも貢献している可能性がある。通常電気めっきは角が厚くなる傾向にあるが、治具の枠が製品角への電気集中を抑制し、結果として膜厚の均一化の手助けをしているとも考えられる。

## 2.2.4 マイクロ金属材料の電子ビーム溶接最適条件の確立

金属薄材の精密溶接において、許容寸法誤差、投入する電子ビームエネルギー、また、素材の熱容量・熱伝導率との関係を明確した。適切な溶接条件を用いることによって、厚さ 20  $\mu\text{m}$ 、10  $\mu\text{m}$  材質の異なる SUS304、Ti 材に対してそれぞれ同種及び異種材の重ね溶接に成功した。また、薄材を 3D 円筒形状に成形した部品の溶接にも成功した。マイクロ金属デバイスの接合技術として、今後期待される。

厚さ 20  $\mu\text{m}$  の箔材 2 枚を重ねて、電子ビームをライン照射し、SUS と Ti で、それぞれの材料を組み合わせ、溶接性について調べた。図 10 に共焦点レーザー顕微鏡により観察した溶融部断面を示す。材料物性値の違いから SUS と Ti で溶接幅が異なる。

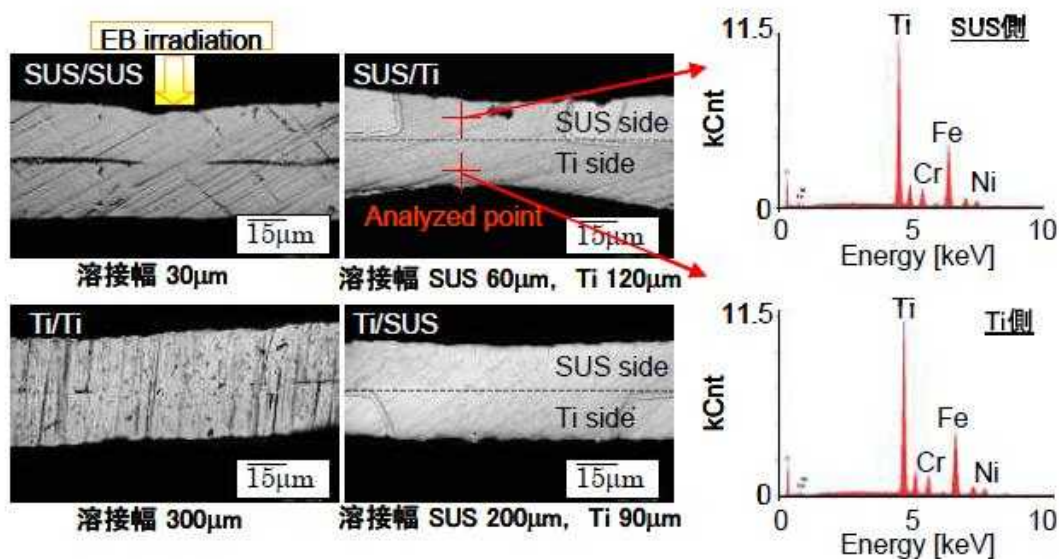


図 10 重ね合わせた箔材の溶接部断面

重ね合わせ溶接を行った結果を用いて円筒溶接を行った。材料は Ti 箔材を使用した。図 11 に Ti 箔材の円筒溶接を行った結果を示す。電子ビーム溶接により Ti 箔材の円筒構造作製に成功した。

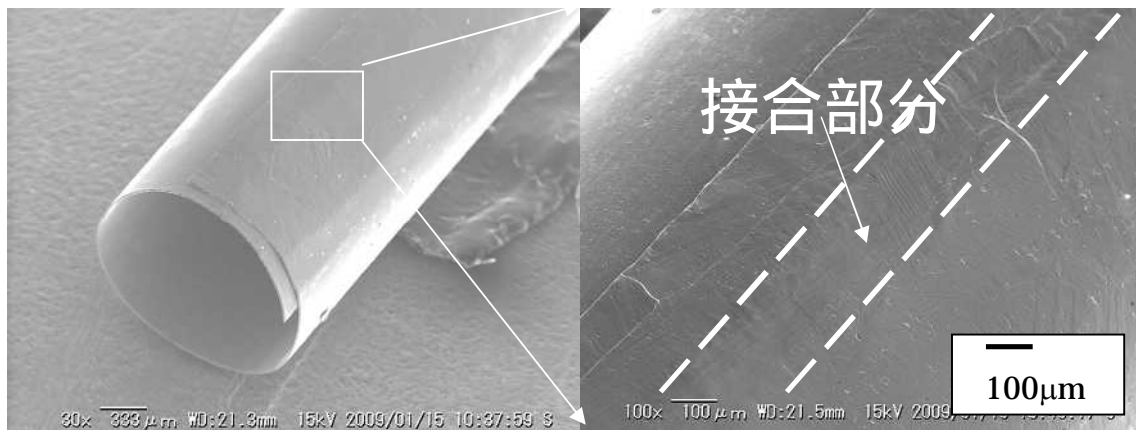


図 11 チタン箔材の円筒溶接

## 2.2.5 $\mu$ ポンプ駆動技術の開発

ポータブル化を想定し、アクチュエータは小型化に有利な板状 PZT を用いることとした。一般に、板状 PZT は積層 PZT に比べ、小型化に優れた反面パワーは劣る。そのため、板状 PZT を  $\mu$ ポンプに適用する場合は、ダイヤフラムを変位しうる条件を見つけることがポイントとなる。そこで変位量を指標として、板状 PZT 付のダイヤフラム単体を対象として、各種条件の検討を行った。パラメータは、ダイヤフラム厚、PZT 駆動電圧、および PZT 駆動周波数とした。



図 12 板状 PZT 付ダイヤフラム外観

板状 PZT は、0.15mm厚(日本セラテック メガセラ事業部製 D 材、Cr/Au 成膜品)を 7mm角に切断した。ダイヤフラムは、SUS 304- $\Phi$ 12mm、厚み：3種類(0.02mm、0.03mm、0.05mm)を用いた。2液性エポキシ系接着剤の2液を混合攪拌後、60 にて 30 分間脱泡させた後、これを用いて板状 PZT をダイヤフラムに接着した。PZT 上面から加重を掛けた状態で、120 にて 2 時間硬化させた。図 12 に製作した板状 PZT 付のダイヤフラムの外観を示す。

印加する電圧の駆動波形について、基本を Duty50%の矩形波とするが、瞬間的な PZT のオーバーシュート(過変位)による経時破壊を防止するために、短時間ではあるが+側の立ち上がり及び-側の立ち上がりにおいて、訛を持たせる波形とした(図 13)。

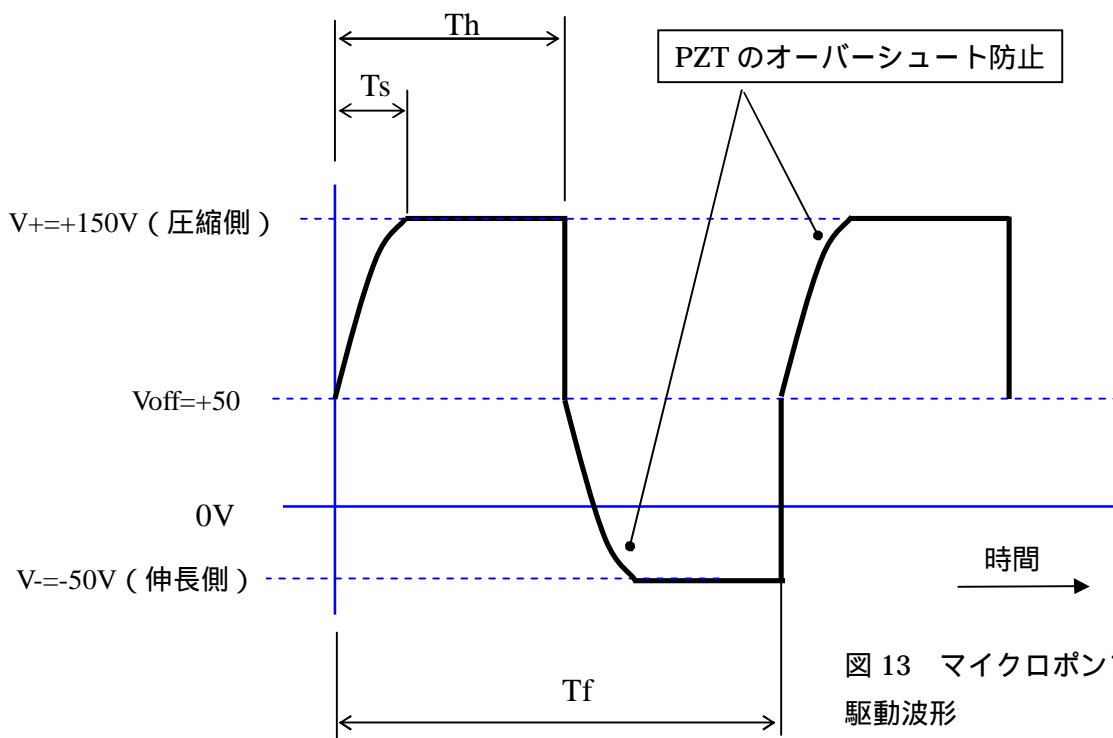


図 13 マイクロポンプ駆動波形

## 2.3 ポンプ・バルブ試作

高精度に製作した  $\mu$  バルブを用いて、2種類の  $\mu$  ポンプを試作した。まず、大流量の仕様に対してはダイヤフラム型ポンプ、小流量の仕様に対してはチューブ型ポンプをそれぞれ試作した。ダイヤフラム型ポンプには、薄膜型 PZT を実装し、矩形波信号で、評価実験を行った。また、チューブ型ポンプは、形状記憶合金及び外部振動による駆動を試みた。何れも要求仕様に満足する流量が得られた。特に、ダイヤフラムポンプの場合は、高い自給性を有し、気泡が混入された場合でも、安定したポンプ特性を得られており、実用化が期待される。

### 2.3.1 ダイヤフラム型 $\mu$ ポンプの試作と機能評価

一体化  $\mu$  バルブは、INLET 側のアッセンブリーと OUTLET 側のアッセンブリーの2種類を製作し、ポンプケースに圧入した。ポンプケースには送液用のポンプチャンバを予め形成してあり、本評価においては  $\Phi 11\text{mm} \times$  深さ  $t=0.05\text{mm}$  として機械加工によって形成した。その上部に予め  $7\text{mm} \times t 0.15\text{mm}$  PZT を貼り付けたダイヤフラムをカシメリングによって固定することで構成した(図 14、図 15)。

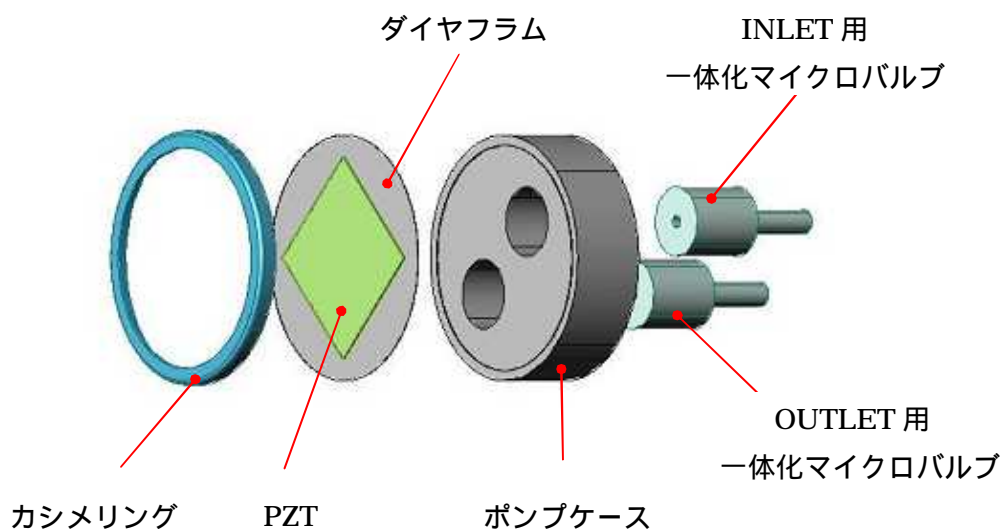


図 14 ダイヤフラム型マイクロポンプ図



図 15 ダイヤフラム型マイクロポンプおよびマイクロバルブ



上記により精密加工された金属部品の組合せによってポンプを構成した試作品の仕様概要は以下の通りである（表 3）。

表 3 仕様概要

項目	仕様
バルブプレート	材質 SUS304H t=0.01mm
インブッシュ	材質 Ti t=0.3mm 鍛造によりマイクロリム成形
ダイヤフラム	材質 SUS304H t=0.03mm
PZT	材質日本セラテック製 D 材 7 mm t=0.15mm Cr/Au 成膜
筐体	材質 SUS303
電極引出し	材質エナメル被覆 NiCr 線 Φ0.05mm ドータイト接続
シール方法	液状シリコン、2液性エポキシ接着剤にて熱硬化

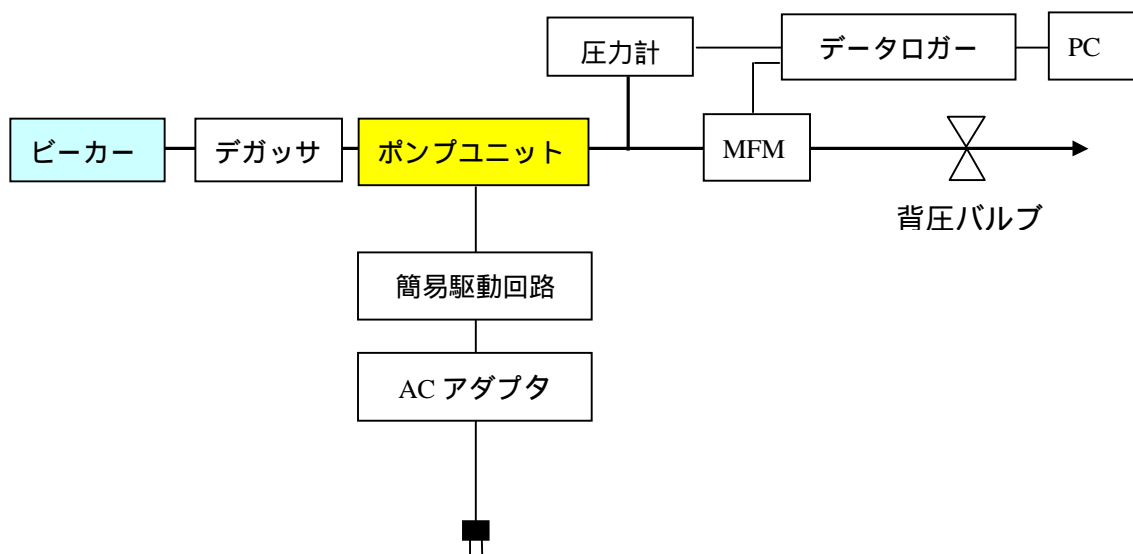


図 16 P-Q 特性評価系

表 3 の項目を  $\mu$  ポンプ製作の為に具体的な仕様概要として  $\mu$  ポンプユニットを製作し、その性能特性を評価した。図 16 に製作した  $\mu$  ポンプユニットの PQ 特性を評価する実験系の模式図を示す。評価において使用した液体は精製水である。

まずビーカーに注いだ精製水をデガッサー（溶存空気除去）経由で評価対象となる  $\mu$  ポンプユニットの上流側となる INLET に接続する。使用する液体中にはその種類によっても量が異なるが、酸素や 2 酸化炭素などの溶存空気を内在している場合が多い。ポンプユニットの送液性能を評価する場合に、液体中の溶存空気を除去してからポンプユニットに導入する方がポンプチャンバ内で圧力や温度の変化で発生する気泡を抑えることが可能とな

り、微少な流量特性の評価には望ましい。

$\mu$  ポンプの下流側には圧力計とマスフローメーター (MFM) 精製水を大気開放する直前の経路に背圧バルブ、が液体導通用チューブにより接続し配置されている。ポンプユニットは 12V AC アダプタが接続された簡易駆動回路からの電圧印加によって駆動する。

ポンプユニットが送液した精製水流量を、背圧バルブによって絞り、背圧を徐々に与えた時に、その時の背圧に対応した流量レートを読み取ってグラフにプロットしたものを P-Q 特性 (Pressure vs Flow rate) と言う。ポンプ性能を示す重要な指標として一般的によく用いられる。

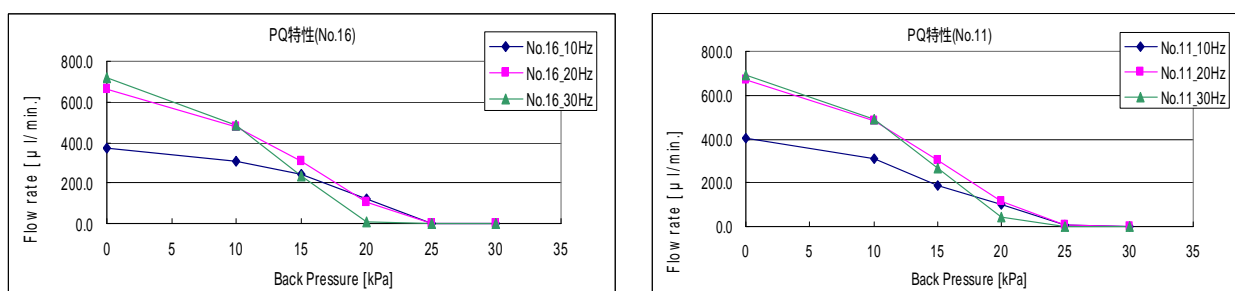


図 17 マイクロポンプの動作特性

今回試作したいくつかの  $\mu$  ポンプサンプルについて、上記の実験系で取得した P-Q 特性結果について図 17 に示す。

試作した多くのポンプユニットについて、 $f=10$  Hz,  $P=0$  kPa の駆動条件で、 $Q=400\mu\text{l}/\text{min}$ . 以上の流量レートを得た。駆動周波数に対する流量変化については、20Hz までは最大流量が増加するものの、30Hz では増加量が少ないかあるいは減少する傾向があった。最大背圧はほとんどのポンプユニットが 25 ~ 30kPa 付近であった。川下企業の要望する仕様に対して、流量レートでは合致する領域であると考えられる。

閑話休題 ( 2 ) P Q 特性って何？ :

背圧 P が大きいと、流量 Q が小さくなる、その傾向のことです。理想的にはどんな背圧でも所定の流量で送りたいのですが、いずれ力負けして流れなくなります。ところで「背圧」は、ポンプの入り口の圧力と思うかもしれませんが、さにあらず、出口の圧力 ( P 出口 ) から入り口圧力 ( P 入口 ) を引いた値です。流れの下流側をバックという習慣からそう呼びます。今回の最大背圧 25 ~ 30kPa は、250 ~ 300 ヘクトパスカル、約 0.25 ~ 0.30 気圧ですから水柱換算で 250 ~ 300mmH<sub>2</sub>O です。まだまだ不足ですが、ポンプに組み込んでいるバルブのシール性を高めることで改善できると期待しています。

### 2.3.2 チューブ型 $\mu$ ポンプの試作と機能評価

医療用 $\mu$ ポンプは、患部に直接投薬できるメリットから体内に埋め込み使用することが期待されている。しかし、 $\mu$ ポンプシステム全体として体内に埋め込むほど小型化ができていないという課題がある。従来の $\mu$ ポンプは駆動電源が必要となり大きくなってしまふ。本研究では医療用体内埋め込み型 $\mu$ ポンプの小型化を実現するために外部電源によるワイヤレス駆動を提案し、創成及び評価をした。

医療用 $\mu$ ポンプに求められる要求は生体適合性、またポンプ仕様一例として最大流量300nl/min、定格運転背圧30kPa以上、ユニットサイズ $\Phi 20 \times 10$ mm以下である。

$\mu$ ポンプの構造材料はシリコンを用いているものが多い。シリコンは精密加工が容易というメリットがある。一方で生体適合性が悪いというデメリットがある。このため医療用 $\mu$ ポンプにシリコンは適さない。生体適合性が良い材料は金属、高分子、セラミックスである。ポンプ性能はバルブに依存するため、バルブは高機能が求められる。<sup>(1)</sup>本研究では、剛性や強度に優れた金属材料であるステンレス製で小型化に適したチェックバルブ(2.5mm LEE CCPI SERIES CHEK、菊池製作所製バルブ)を用いる。また、伸縮性に優れたシリコーンチューブ(内径2mm 外径3mm)をチャンバに用いる(図18)。

図19に試作モデルの流量と圧力損失の関係を示す。順方向と逆方向に圧力差があり、密閉性がよいことがわかる。どちらの流れ方向にも圧力損失が起こるため、どちらの方向にもリークが起こりにくい。

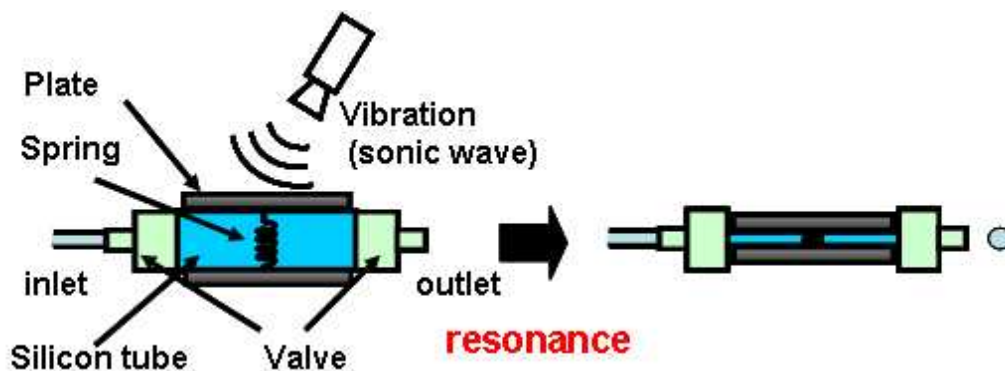


図18 提案するポンプの概略図

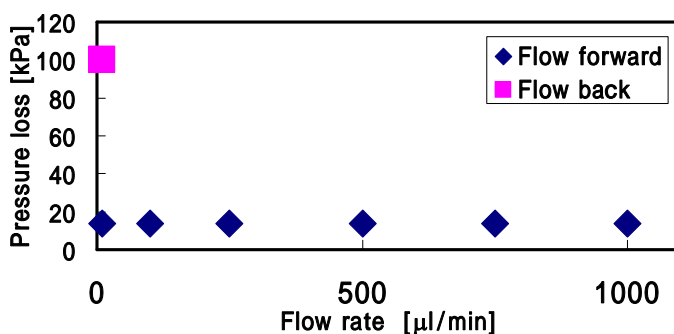


図19 流量と圧力損失

### 3 全体総括

#### 3.1 研究開発の成果

近年、MEMS 関連技術が急速な発展を遂げてきた。中でも情報家電に使用するマイクロ燃料電池、生物学・化学分析、マイクロ医療分野で、量産技術による高信頼、低コストな  $\mu$  ポンプ、 $\mu$  バルブが強く求められている。

このため、私どもは地域企業が持っている金属加工技術と地域大学が研究している MEMS 技術をもとに、信頼性の高い金属材料マイクロデバイスの量産システムを開発することを研究目的として研究開発を実施した。金属板材のプレス、絞り加工および型内組立加工により  $\mu$  ポンプ、 $\mu$  バルブ（以下、 $\mu$  ポンプ、 $\mu$  バルブ）を構築し、量産することを目指した。具体的には、高精度金型加工、高精度位置合わせにより、漏れのない流量  $0.1\mu\text{l}/\text{min}$  クラスと  $100\sim 200\mu\text{l}/\text{min}$  クラスの  $\mu$  ポンプ、 $\mu$  バルブを開発した。また、関連要素技術を研究開発し、下記に示す成果が得られた。

##### A．システム設計・数値シミュレーション

ポンプのポンプ特性を左右する  $\mu$  バルブ特性の各種パラメータを設計するためのシミュレーションツールを開発した。具体的には、バルブヒンジ強度と流量との関係、表面粗さ、表面濡れ性などによるバルブシール特性への影響などを定量評価し、ポンプ設計に反映する。

##### B．要素技術の研究開発

$\mu$  ポンプ・バルブに必要な各種要素技術を研究開発し、加工プロセスの改善などによる高度化を実現した。具体的に以下に示す

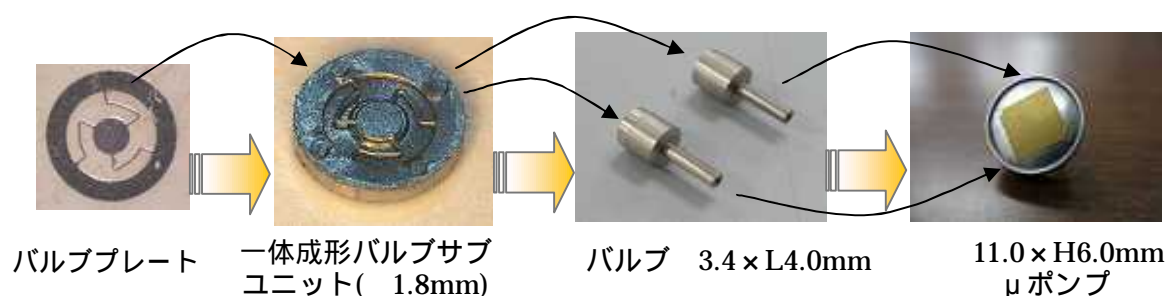
- a) 機械加工精度の改善による部品の形状精度、表面粗さの改善が達成できた。
- b) プレス加工による部品加工・アセンブリの評価と精度改善により、素材の表面粗さ、平坦度の改善、さらに位置合わせ精度の改善が達成できた。
- c)  $\mu$  バルブのシール面に適したパルス電流めっきなどによって、めっき面粒径が制御でき、表面性状の改善ができた。
- d) 薄膜材料の電子ビーム溶接における材料物性や投入エネルギーなどによる影響を明確にし、治具などを含む適切な溶接条件を用いることによって、薄材を用いた 3 次元構造体の創成に成功した。
- e)  $\mu$  ポンプ駆動のため PZT 実装を工夫し、大きな変位及び安定した駆動特性が得られた。

##### C．ポンプ・バルブ試作と評価

$\mu$  バルブ及び  $\mu$  ポンプの部品を要素技術の精密機械加工及び金属薄膜のプレス成形により、製作した。これらの部品を精密にアセンブリし、 $\mu$  バルブ及び  $\mu$  ポンプのプロトタイプを製作した。

試作した  $\mu$  ポンプ・バルブ部品の加工精度、アセンブリ精度、組み立てた後のシール性評価、バルブ動作評価、ポンプ動作評価を行うための評価装置、また、液体粘度や表面性状がマイクロ流れに及ぼす影響を評価できる評価装置を開発し、 $\mu$  バルブ及び  $\mu$  ポンプの吐出量、耐圧などの特性評価を行った。

以上のように、本プロジェクトが目標としている情報家電用、医療機器用の  $\mu$  ポンプ、 $\mu$  バルブの開発に成功した。 $\mu$  バルブと  $\mu$  ポンプ試作品はそれぞれ高い性能を有しており、今後これらの機能部品の生産技術確立、及び実用化が期待される。また、金属材料のマイクロプレス加工要素技術の高度化、マイクロ接合技術、マイクロシーリング技術の開発にも成功しており、マイクロプレス加工、マイクロ溶接、機能性めっきなどの技術を医療や IT 産業への応用が期待される。



### 3.2 今後の課題

中小企業を中心に世界に先駆けて金属材料  $\mu$  ポンプ・バルブの開発に成功したことは大変インパクトがあり、各社の事業展開にもいい刺激になる。今後、事業化企業の努力により、生産技術の確立と事業化が期待される。モバイル用燃料電池向けで 30 億円 / 1400 万個 / 年、薬液注入用で 10 ~ 20 億円 / 1 万システム / 年が見込まれるが、情報家電メーカーでの、モバイル用燃料電池システムの製品化が遅れている。今後新しいエネルギーに対する需要が高まると予想されるので、それに対応した事業化の準備を進める。ただし、このような新規技術はまだ多くの課題が残されている。引き続き、大学、研究機関が中心になって、各種要素技術の研究開発の継続と生産技術確立支援を進める予定である。

#### 問い合わせ先

1. 事業化企業： 株式会社菊池製作所、〒192-0152 東京都八王子市美山町 2161-21、  
e-mail : yasanari.kabasawa@kikuchiseisakusho.co.jp
2. 委託先、事業管理者： タマティーエルオー株式会社、  
〒192-0083 東京都八王子市旭町 9-1、e-mail : info@tama-tlo.com
3. 委託者： 関東経済産業局産業部製造産業課、電話：048-600-0313