

東京電機大学

博士論文

**EHD ポンプの高流量化に基づく新たな  
流体駆動源の開発とそのロボット駆動  
機構への応用に関する研究**

**Development of a novel fluid drive source based  
on high flow rate EHD pumps and its application  
to robot drive mechanisms**

2024(令和6)年 3月

武井 裕輔

## 研究概要

Electro hydrodynamics (EHD) 現象とは、絶縁性の液体中に挿入した電極間に高電圧を印加すると液体に攪拌や拡散などの流体運動が起こり、流れが発生する現象である。この現象に対して、これまでに様々な研究機関で応用研究が行われており、一方向の流動を取り出すことによって圧力源として使用可能な EHD ポンプが開発された。この EHD ポンプは機械的駆動部を持たず、電圧の印加のみで数[kPa]から数百[kPa]の高圧力を吐出可能であり、優れた静穏性、制御性を有している。しかし、流動の発生メカニズムが解明されていないことから試行錯誤的な開発が繰り返されており、高圧力の吐出は可能ではあるものの、吐出流量が低く大型の機器の駆動は困難である。そのため、マイクロマシンの駆動源として利用されることがほとんどであった。

これに対して著者らは、電極構造の試作と実験、電界解析を繰り返すことで独自の電極構造の開発および最適化を重ねてきた。その結果として、他の EHD ポンプや Electro Conjugate Fluid(ECF)ポンプに対して高い圧力・流量を吐出可能な EHD ポンプの開発を行い、大型の回転アクチュエータや揺動アクチュエータへと応用してきた。しかし、著者らの研究グループによって開発された EHD ポンプについても、吐出流量は従来の流体駆動源には及ばず動作速度の面から実用化が困難であり、応用範囲はいまだに限定的であった。

そこで、本研究ではEHD現象によって吐出された流体を流体力学で考え、流路断面積を増大させることによる吐出流量を増加させる方法を適用した。また、それに伴う新たな電極構造について電界解析を行い、これまでに検討されてきた電極構造により発生する電界と比較することで、流路の拡大により高流量化した新たな流体駆動源として高流量 EHD ポンプを開発した。

次に、高流量 EHD ポンプを福祉機器や生体模倣ロボットへ応用するための第一歩として、開発した高流量 EHD ポンプを応用した EHD アクチュエータの開発およびそ

れを駆動源としたロボット駆動機構の製作を行った。

まず、高流量 EHD ポンプを応用するアクチュエータとして人工筋肉中でも代表的な McKibben 型人工筋に着目した。McKibben 型人工筋は構造上の問題点である、駆動圧力の高さ、収縮力・収縮率の算出が容易でないことに起因する制御の難しさを有している。この問題に対して EHD ポンプを駆動源とすることで解決可能であると考えた。具体的な構成として、蛇腹型の膨張体の上下に板を配置し、その間を通した紐から常に直角に収縮力を発揮する構造を有する EHD 人工筋の開発を行った。その結果、開発した EHD 人工筋は収縮率によって発揮される収縮力が変化せず、常に印加圧力に比例した収縮力を発揮可能であった。また、EHD ポンプは電極構造によって流体の圧送・吸引をスイッチで切り替えることが可能であることから、MPa オーダーの印加圧力が必要な McKibben 型人工筋に対して数 kPa の低圧での駆動が可能であり、機械的駆動部を持たない圧力源であることによる高い静穏性も有している。以上のことから、開発した高流量 EHD ポンプの駆動に適したアクチュエータである EHD 人工筋は、一般的なコンプレッサ等の空圧源を駆動源とする McKibben 型人工筋の問題点を解決し、より応用性の広いアクチュエータであることを確認した。

次に、開発した EHD 人工筋を駆動源としたロボットの駆動の実現可能性を確認するために、魚型ロボットを想定した EHD 人工筋駆動のロボット駆動機構を構築し、主に動作速度に着目して動作の確認を行った。その結果、約 400mm の魚型ロボットの尾ヒレ動作を想定した尾ヒレ駆動用ロボットを 2Hz の速度で動作させることに成功した。

よって、新たな流体駆動源である高流量 EHD ポンプは、従来の EHD 現象の応用先であるマイクロアクチュエータおよびマイクロマシンとは異なり、人の周りで使用することを目的としたメートルオーダーサイズの機器への応用が可能であるという、EHD 現象の新たな可能性を示すことができた。

## — 目次 —

第1章 緒言	5
1.1 ソフトロボティクスとその駆動源の問題点	5
1.2 EHD現象	7
1.2.1 EHD現象とは	7
1.2.2 EHD現象の発生メカニズム	9
1.2.3 近年の研究動向	10
1.3 先行研究として開発されたEHDポンプ	11
1.3.1 EHDポンプの構造	11
1.3.2 使用する作動流体	17
1.4 EHDポンプの問題点	19
第2章 研究目的	20
第3章 EHDポンプの高流量化	22
3.1 高流量化の手法に関する検討	22
3.1.1 EHDポンプの拡幅化による高流量化	24
3.1.2 EHDポンプの並列化による高流量化	26
3.2 考案したポンプ形状における発生電界の解析	27
3.2.1 配線の影響がない場合の電界解析	27
(1) 解析モデルおよび解析条件	27
(2) 解析結果	30
3.2.2 配線による電界が与える影響の解析	37
(1) 解析モデルおよび解析条件	37
(2) 電界解析結果および考察	40
第4章 新たな流体駆動源の開発	50
4.1 高流量EHDポンプの開発	50
4.1.1 製作した基準EHDポンプ	50
4.1.2 拡幅型高流量EHDポンプの構造	54
4.1.3 並列型高流量EHDポンプの構造	56
4.2 開発した高流量型EHDポンプの性能評価	59
4.2.1 圧力性能測定結果	61
4.2.2 流量性能測定結果	62
4.2.3 比較および考察	64
第5章 新新たな流体駆動源のロボット駆動機構への応用	67
5.1 高流量EHDポンプに適したアクチュエータの開発	67
5.1.1 EHD人工筋の構造	70
5.1.2 収縮力の概算方法	74

5.1.3	開発したEHD人工筋	75
5.1.4	EHD人工筋の特性評価のためのEHDポンプ	76
5.1.5	開発したEHD人工筋の収縮率特性および収縮力特性	79
(1)	実験方法	79
(2)	実験結果および考察	82
5.2	EHD人工筋を駆動源とするロボット駆動機構への応用	86
5.2.1	考案した尾ヒレ駆動機構	86
5.2.2	製作した高流量EHDポンプ	92
5.2.3	製作したEHD人工筋	99
5.2.4	尾ヒレ駆動機構の製作および動作実験	101
5.3	考察	103
第6章	結論	104
—	謝辞—	107

# 第1章 序論

## 1.1 ソフトロボティクスとその駆動源の問題点

ロボット技術とは元々工場などで使用される産業ロボット・生産ロボットが主流であり、工場・産業のオートメーション化において人間に代わり生産効率の向上、製品コストの低減、品質向上に重要な役割を果たしてきた<sup>1) 2)</sup>。これに対して、近年では人間の周りで使用されるロボットへの注目度が高まり、より安全かつ生物に近い動きを目指した柔らかいロボットである「ソフトロボティクス」に関する研究開発が活発に行われている<sup>3)</sup>。ソフトロボティクスとは、柔軟性材料の機械的・電氣的性質を利用したロボットシステムに関する学術分野であり<sup>4)</sup>、2021年にはThe 5th International Conference on Active Materials and Soft Mechatronics (AMSM2021)が開催されるなど、国内外問わず様々な研究が活発に行われている。このソフトロボティクスは2010年頃から新興分野として認知され始め急激に研究者を増やしているが<sup>1)</sup>、キーワードを遡ると1999年に「ソフトロボティクス」特集についてという記事が日本ロボット学会誌に掲載されており、『「メカニカルなソフトネスの導入」は、非構造環境下で働くロボット、あるいは人間と共存するロボットの設計、製作するための必須条件であることが明白になった』といった記述がある<sup>5)</sup>ことから、当時のソフトロボティクスは人間との協調や安全性の確保に焦点があったことが分かる。現在に至るまでにソフトロボティクスは柔らかい動作が可能な設計から、柔らかさを持つロボットへと意味を広げているが、人間とロボットの協調や生物を模倣したロボットの開発において非常に重要な学問であるといえる。

こうしたソフトロボティクスで扱うソフトロボットは一般的に電動アクチュエータや空気圧アクチュエータ、水圧アクチュエータが使用されており、例えばモータなどによって直接関節を動作させ、制御によってコンプライアンス性を保つ<sup>6)</sup>場合もあれば、空気圧人工筋などアクチュエータ自身が構造的な柔軟性を有することで柔らかさを持たせ

る<sup>7)</sup>場合もある。しかし、モータ駆動に関しては電気エネルギーによって機械的な駆動部を動作させ、動力を得る構造をしていることから、複数のセンサによって常に機構の状態を把握し続け、複雑な制御を行う必要がある。また、空気圧・水圧アクチュエータにおいては、アクチュエータ単体では動作ができず、ポンプやコンプレッサなど別の駆動源によって流体を圧送してその圧力を利用して駆動しており、これらの駆動源はモータ駆動と同様に機械的駆動部を電気で動作させ圧力を得ていることから、構造的な複雑さと制御的な複雑さの両方の問題を抱えている。

これらの問題に対して、本研究では機能性流体アクチュエータに注目し、機械的駆動部を有さない、EHD (Electro Hydro Dynamics) 現象を応用した EHD ポンプのロボットへの応用を提案することとした。EHD 現象および EHD ポンプに関してはこの後の章で詳しく説明する。

## 1.2 EHD現象

### 1.2.1 EHD現象とは

EHD (Electro Hydro Dynamics)は、電気流体力学と呼ばれ、電磁気学と流体力学の融合した境界領域の学問である。

電磁気学の中でも主体となる性質によってその名称は異なり、特に磁界の作用が主体となった物は MHD (Magneto Hydro Dynamics)と言われる。また、電界の作用が主体となっている物は EHD と言われており、EHD は厳密に分類すると、流体として気体を考える場合は EGD (Electro Gas Dynamics)と分けられる<sup>8)</sup>。この中でも流体として液体を考える EHD 現象とは、絶縁性の流体中に電極を挿入し高電圧を印加することで流体に攪拌、拡散移動などの流体運動が発生し流れが生じる現象を指し、歴史的にも古くから知られている電気浸透現象、電気泳動や流動電位、電気運動学的現象も EHD 現象の研究領域に入る<sup>9)</sup>。

また、EHD 現象と類似した現象として横田らによって発見された ECF (Electro Conjugate Fluid 電界共役流体)効果<sup>10)</sup>がある。この現象は ECF と呼ばれる特殊な液体に不均一な高電圧を印加することで電極間にジェット流が発生するものでありEHD 現象とは異なる現象であるとされてはいるものの、流動の発生メカニズムについては明らかになっていない。マイクロアクチュエータの開発など応用研究が行われているものの<sup>11)</sup>、近年ではEHD現象の一つであるという認識になっている。

日本における EHD 現象は数元伊之助によって『液状誘電体が電極を上昇する現象』<sup>12)</sup>として1956年に初めて報告された。実験装置は図1-1に示す様なガラス容器中に絶縁性液体が注入され、電極を挿入することで構成されている。エボナイト板に固定されたニッケル板を電極としており、電極を支持している針金に沿うように液面上昇現象が確認された。このとき、数元氏が行った実験においては、液面上昇現象を示す

液体はクロロホルムとキシレンのみであり、クロロホルムは正電極、キシレンは負電極において液面上昇が観察されている。この実験における液面上昇は非表面張力に近い非常に小規模なものであったが、後にこの現象は数元効果と呼ばれ、EHD の基本的な現象としてその名前は広く知られている。

この現象は赤木らによる DBDN(ドデカン2酸ジ-n-ブチル)を作動流体としたポンプの作成や<sup>13)</sup>、花岡らによる不平等電界下における流動の発生<sup>14)</sup>、中野らによるリングと円筒の非対称電極により発生する流動の安定作動条件の検討<sup>15)</sup>など様々な研究者によって再現されており、同様の現象であるとされている ECF においても前述の研究<sup>10) 11)</sup>の他に、横田らによる電子チップ冷却用平面薄型ポンプの開発や<sup>16)</sup>、金らによるマイクロ化を目指した MEMS 技術による針状電極とリング状電極を有する ECF ジェット発生器の開発<sup>17)</sup>など空気圧や他のアクチュエータに代わる新たなフルードパワー技術として実用化に向けて精力的に研究が行われている。

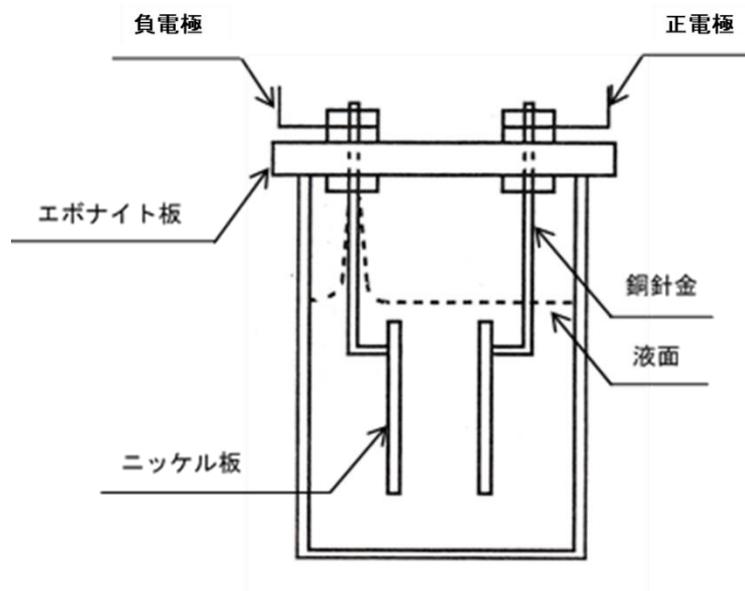


図 1-1 液面上昇実験<sup>10)</sup>

## 1.2.2 EHD現象の発生メカニズム

1章2節で示した通り EHD 現象は様々な形で応用が行われているものの、その発生原理については完全には明らかにはなっていない。そのため、現象のモデル化は十分には進んでいないのが現状であり、試行錯誤的に非効率な開発が進められている。ここで、EHD 現象の発現は主に電界が液体へ及ぼす影響であるため、電界が流体に及ぼす単位体積あたりの力  $F[\text{N}/\text{m}^3]$  は、自由電荷密度を  $\rho_t[\text{C}/\text{m}^3]$ 、媒質(誘電体)の密度を  $\rho_m[\text{kg}/\text{m}^3]$ 、電界強度を  $E[\text{V}/\text{m}]$ 、誘電率を  $\epsilon[\text{F}/\text{m}]$  とすると一般的に(1.1)式で表すことができ<sup>18)</sup>、

$$F = \rho_t E - \frac{1}{2} E^2 \nabla \epsilon + \nabla \left( \frac{1}{2} E^2 \frac{\partial \epsilon}{\partial \rho_m} \rho_m \right) \quad (1.1)$$

第一項は自由電荷に働くクーロン力であり、第二項は誘電率  $\epsilon$  が空間的に変化することによる力で、分極電荷に作用する力と考えることができる。また、第三項は誘電率  $\epsilon$  が媒質の密度  $\rho_m$  の変化によって生じる力で電歪力とも呼ばれる。これらの力の合成によって EHD 現象による流動が発生すると考えられている。

この式に加えて主に 4 種の発生メカニズムが報告されており、最も一般的なものは(1.1)式の第一項によるイオンドラッグポンピングといわれる現象である<sup>19)20)21)</sup>。これは、電界放出等により尖った電極先端から液体中にイオンが注入され、電界によりクーロン力を受けてエネルギー変換により流動が発生するとされており、液体ジェットの発生も確認されている。しかし、荷電粒子の注入により液体の電気的特性が劣化し、液体の交換頻度が高いことが問題視されている。また、その他にも誘導電荷と電場の相互作用により発生する誘導ポンピング<sup>14) 22)23)</sup>や純伝導ポンピング<sup>24 25)26)</sup>なども報告されている。つまり現段階において流動の発生メカニズムは特定できておらず、各研究機関において様々な要素が流動の発生に起因していると考えられていることが現状である。

### 1. 2. 3 近年の研究動向

EHD 現象(および ECF 効果)の特徴として電界や電荷注入といった電氣的な作用によって液体流動が発生することから機械的駆動部を必要とすることなく液体に対して流動を発生させることができるため、モータやコンプレッサに代わる新たなアクチュエータ技術として注目されており、ECF 効果によって電極から流動を発生させロータを回転させるマイクロモータ<sup>10) 11)</sup>や電極を複数並べることで圧力を得ることが可能な EHD ポンプモジュール<sup>13)</sup>、が開発されている。また、これらの EHD アクチュエータを組み込んだ機器の開発も盛んに行われており、CPU 冷却を目的とした ECF 薄型ポンプ<sup>16)</sup>や竹村らによる ECF によって駆動するイクロ人工筋アクチュエータ<sup>27)</sup>並びに山口らによる ECF ジェットにより駆動するポンプとタンクが一体化されたロボットフィンガ<sup>28)</sup>、横田らによる液圧駆動収縮セルを用いることにより柔軟性を持つぜん動駆動マイクロマシン<sup>29)</sup>など様々なマイクロマシンへの応用が行われている。また、小林らによって化学分析の分野における試料の検査や合成手法である Droplet  $\mu$  TAS への利用を目指した液滴混合デバイス<sup>30)</sup>なども開発されている。

さらにポンプ自体の発展として様々な電極構造や製造方法も検討されており、田原らによる MID 工法で作成した二重螺旋状の電極対による EHD ポンプ<sup>31)</sup>や Sato らによる MEMS 技術を用いた EHD ポンプ<sup>32)</sup>などがある。このように、EHD 現象(ECF 効果)は高圧力を吐出可能かつ機械的駆動部が不要であり、マイクロマシンの分野において多くの応用研究が行われている。

一方、著者らの研究グループでも以前から EHD 現象に関する研究を行っており、EHD 現象による液体の流れを一方向に発生させ、その勢いで回転運動を発生させる回転型アクチュエータ<sup>33)</sup>や約100[kPa]発生可能な EHD ポンプを駆動源とした揺動運動型アクチュエータ<sup>34)</sup>など他の研究機関の流れとは異なり中・大型なアクチュエータやデバイスの開発が行われてきた<sup>35)</sup>。

## 1.3 先行研究として開発されたEHDポンプ

### 1.3.1 EHDポンプの構造

従来のEHD現象では図1-2に示すように電極を平行に配置し電界強度を均一にするものや、図1-3に示すように電極を互いに垂直に配置し、電界強度の勾配を急激に変化させる電極構造が多く用いられている。

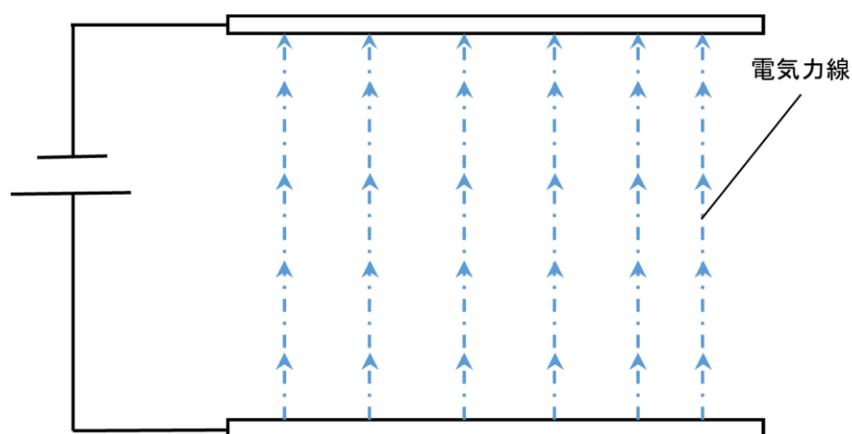


図1-2 平行電極

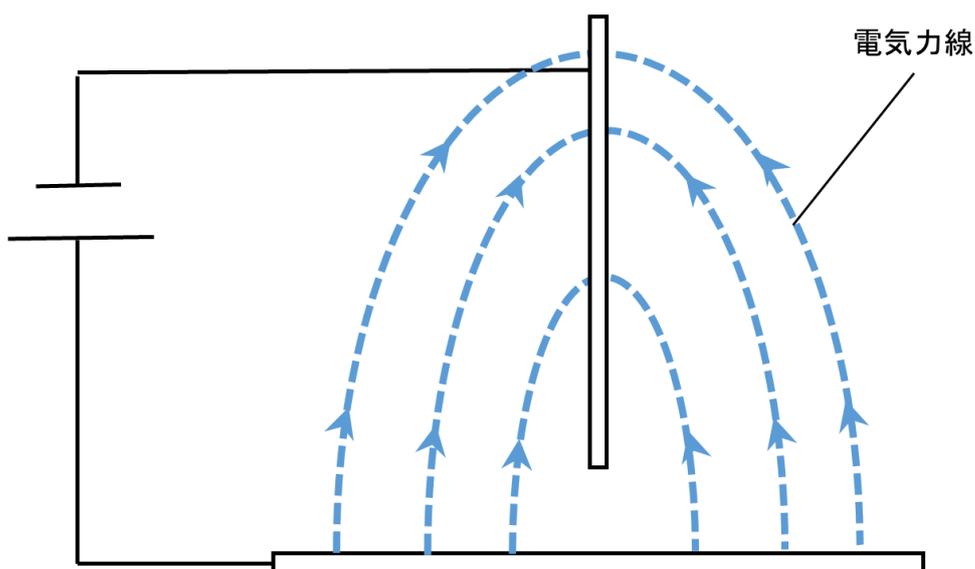


図1-3 垂直電極

それに対して著者らの研究グループによる研究<sup>36)</sup>により、電界 E において流体に働く力を表す式(1.1)式から微小誘電球体を考え、真空の誘電率を $\epsilon_0$ 、微小誘電球体の誘電率を $\epsilon$ 、電荷を $q$ 、半径を $a$ とし、Clasius-Mossoti の関係式 $(\epsilon - 1)/(\epsilon + 2) \propto \rho$ を適用し右辺第三項を変換することで(1.2)式を得た。

$$F = \rho_t E - \frac{1}{2} E^2 \nabla \epsilon + 2\pi a^3 \nabla \frac{\epsilon(\epsilon - \epsilon_0)}{\epsilon + 2\epsilon_0} \nabla E^2 \quad (1.2)$$

(1.2)式より、微小誘電球体に働く力は、右辺第一項による電界強度、第二項による電界強度の2乗および誘電率の勾配、第三項による電界強度の2乗の勾配により影響を受けているため、電荷の注入による流体の劣化が発生しない、電界強度の勾配を利用した EHD 現象による流動が重要であると考えられる。この時、電界強度の勾配により働く力は勾配が電気力線と平行な場合(図 1-4a)と、垂直な場合(図 1-4b)に分けられ、電界勾配と平行な場合は等価な双極子モーメントを持つ流体分子は分極した電荷に働く力の大きさが異なるため電界強度の高いほうへと EHD 現象を生じ、右方向へ流動する。また、垂直な場合は正と負の電荷に働く力の大きさは等しいが方向が異なるため、電気力線が曲線であるため右方向へ合力が生じ、電界強度は曲率の内側がより強くなるため、電気力線の曲率中心へと EHD 現象が生じる。

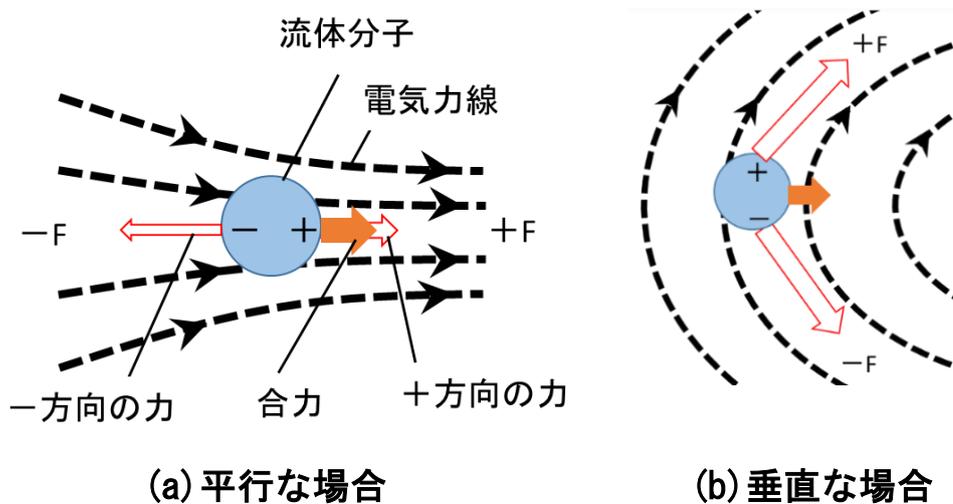


図 1-4 電界中におかれた流体分子の挙動<sup>36)</sup>

そこで、強いEHD現象を発生させつつ、指向性を有する流動を生じさせるためには電界強度が徐々に変化するような分布を形成する電極が必要である。また、加速された流体を一点に集めて拡散させるのではなく、流れがノズルの様な形状から噴出する構造であれば、指向性のある流動を得ることができると考え、図 1-5 に示すように平板電極(図 1-5 中の A)とそれに対して傾斜させた平板電極(図 1-5 中の B)を配置する電極構造が考案された<sup>36)</sup>。この構造によって電界強度分布に傾きが発生し、二枚の電極間の間隔が狭い領域にある流体分子は電界強度の勾配により強く作用し、電気力線の曲率の小さい方向へ流動する。また、この電極構造を ANSYS(ANSYS.INC 製)によって 2 次元電界解析すると図 1-6 に示すように電極間隔が狭い傾斜させた平板電極の先端において最も電界強度が高くなり、二枚の電極との間隔が徐々に広がるに伴い、急激な電界分布の粗密が形成されていることが確認されている。

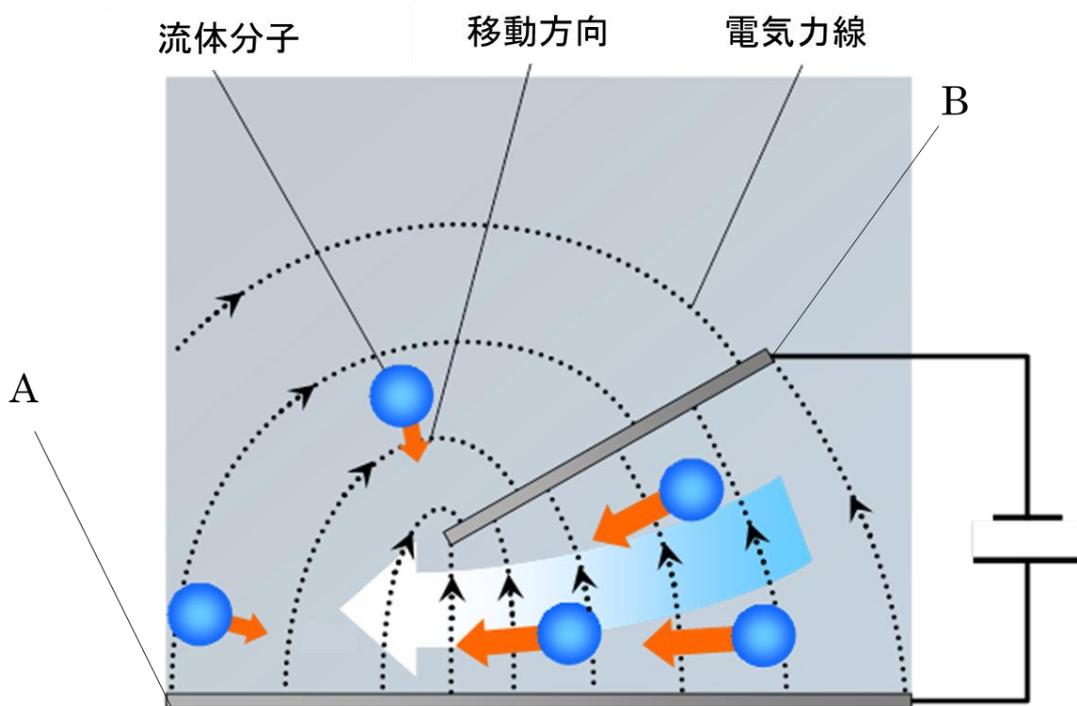


図 1-5 板状の電極と傾斜させた平板電極周りの流体分子の動き<sup>36)</sup>



図 1-6 電界解析結果<sup>36)</sup>

これらを元に構成した EHD ポンプ及び電極構造を図 1-7 に示す。流路内の壁面に板状電極を、そして板状電極に対し 30[deg]傾斜させた平板電極(寸法 10×10[mm])を配置した。また、狭隘路と呼ばれる流路で最も狭い部分の電極間隔を 1[mm]、長さを 2[mm]としており、10[kV]印加時に約 3[kPa]の圧力の吐出が可能である。この EHD ポンプは図 1-8 に示すように電極構造を直列に多段化することで発生圧力を高めることが可能であり、図 1-9 に示すように、GND 電極を対称に配置することで、スイッチの切替えによって流れの方向をも切替えることが可能である。さらに、EHD ポンプの特徴として、機械的駆動部を持たないことにより熱や音がほとんど発生しないことに加え、印加電圧に応じた圧力の吐出が可能であり、電圧増加時と減少時のヒステリシスがほとんどないことから、高い制御性も有している<sup>37)</sup>。

以上の点に加えて、EHD ポンプは電極段数や流路形状、筐体の形状などは自由に設計が可能のため、様々な機器の駆動源へと応用することが可能である。

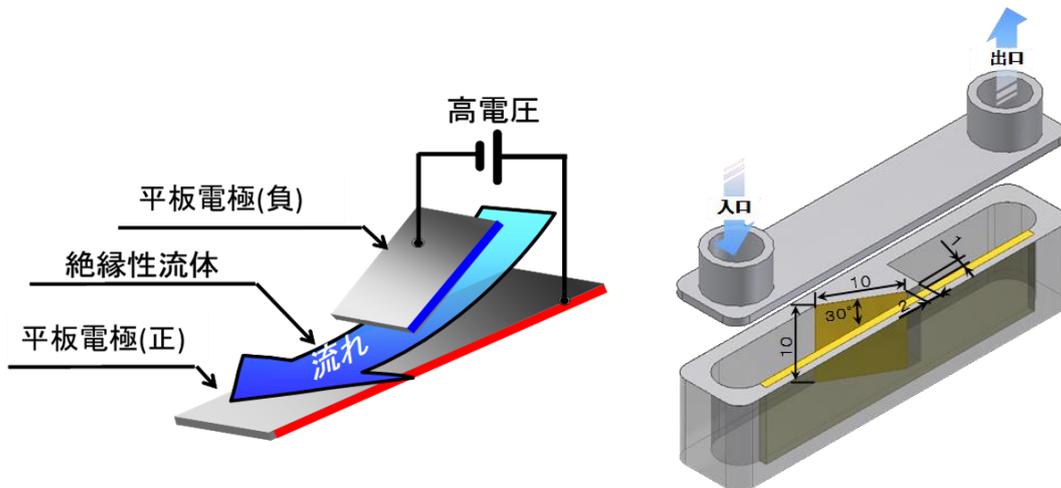


図 1-7 EHD ポンプおよび電極構造

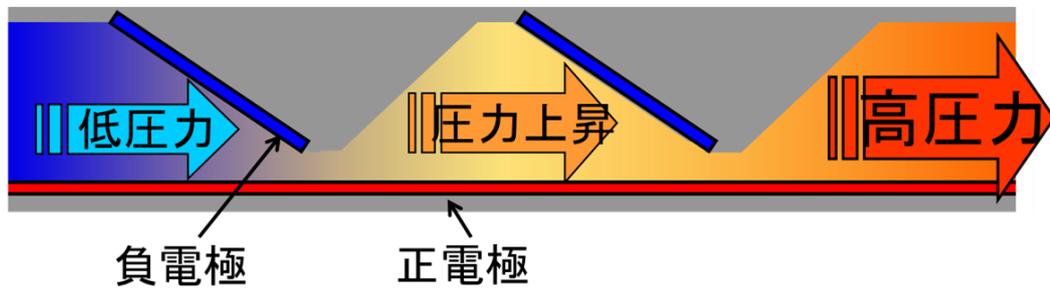


図 1-8 電極構造の直列多段化

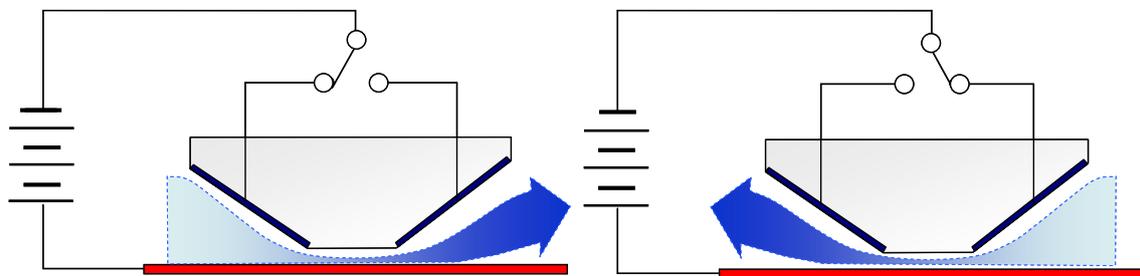


図 1-9 スイッチの切り替えによる流体吐出方向の切り替え

### 1.3.2 使用する作動流体

EHD 現象に使用する作動流体に関して、これまでに著者らの研究グループやその他の研究機関において、様々な検討が行われ液体の種類によって効果の強さやほかの材料との親和性、必要な電圧などのパラメータが異なることが分かっている。そのため、本研究において以下の条件を満たし、かつ EHD 現象の効果も高い HFE-7200を使用することとした。

- ・20[kV/mm]程度の絶縁強度
- ・絶縁破壊により流体が劣化しない高い絶縁耐性を有する
- ・ポンプの材料として使用する可能性が高いアクリルやレジン樹脂、塩化ビニール樹脂、プラスチックなどに与える影響が少ない

HFE-7200は一般的に回路の洗浄液として使用されているフッ素系の絶縁性洗浄剤であり、著者らの研究グループが行った実験においても、他の作動流体に比べ強い流動の発生が確認されている。また、水よりも動粘度が低いことからEHDポンプで流体の圧送をした際の圧力損失も低減できると考えた。表 1-1 に HFE-7200 の物性値を示す

**表 1-1 HFE-7200 の代表物性値**

沸点	[°C]	76
密度	[Kg/m <sup>3</sup> ]	1430
動粘度	[cSt]	0.4
絶縁耐力	[kV(2.54mm gap)]	23
誘電率	[1kHz]	7.25
引火性		なし
地球温暖化係数	[GWP]	55

## 1.4 EHDポンプの問題点

ここまで EHD 現象(ECF 効果)の研究動向および発生メカニズムの候補と EHD ポンプについて述べてきたが、これらの流体ポンプとして、従来の流体を用いたポンプと比較すると発揮可能な流量が少ないことが挙げられる。EHD ポンプや ECF ジェットにおける吐出圧力に関しては、電極対の構造の改良や、電極対の直列化・集積化による電極の直列配置によって高圧力化が取り組まれており、数kPa～数百kPa の吐出が可能となっている。しかし、流量に関してはほとんど取り組まれておらず、ほとんどの研究においてマイクロマシンの駆動源として活用するに留まっている。著者らの研究グループにおいても同様に流量に関する問題を抱えており、他の研究機関よりも大きなデバイスの駆動源として EHD ポンプを使用しているため、低い流量での駆動が可能なデバイスへの適用にとどまっている。

EHD ポンプ機械的駆動部が不要な EHD 現象を駆動源とし、それを効果的に使う部分にも機械的駆動部を持たないことから、駆動時の騒音や振動が少ないといった特徴を持っているため、EHD ポンプを高流量化することでこれまでは応用が困難であった分野にも導入が可能となると考えた。

## 第2章 研究目的

本研究では、機能性流体のソフトロボットへの応用のため EHD ポンプの吐出流量の向上を目指した新たな EHD ポンプの開発とそのロボット駆動機構への応用を目的とする。

1 章で記述した通り、EHD 現象を応用したアクチュエータおよび装置の開発は盛んに行われてきたものの、吐出流量が低いことからマイクロマシンへの応用がほとんどである。一方で、著者らの研究グループでは揺動アクチュエータやそのアクチュエータを蛇腹で多段に連結した揺動型ロボット<sup>38)</sup>、腕に装着したカフを EHD ポンプで膨らませることによって血管を圧迫する止血装置(ターニケット)<sup>39)</sup>等大型の装置への応用を行ってきた。しかし、著者らの研究グループが開発した EHD ポンプも従来の流体駆動源と比較すると流量が低いため流体駆動装置の駆動源として使用した場合に駆動速度が不足し、中大型装置の実用化への壁となっている。

そこで、本研究ではこれまで著者らの研究グループが開発した EHD ポンプの電極構造を基本として、高流量の吐出が可能な電極構造をもった新たな流体駆動源の開発を行うこととした。そして、新たな流体駆動源の開発を行う手順として以下のステップを踏んだ。

- ①流体力学に基づき、高流量を発生可能な EHD ポンプの考案および電界解析を用いた評価
- ②基礎特性の測定による新たな流体駆動源の評価
- ③開発した新たな流体駆動源を駆動源としたロボット駆動機構の開発

以上のステップにより高流量を吐出可能な新たな流体駆動源の開発とそのロボットへ応用を行うこととし、以下に各ステップの具体的方針を示す。

- ① 流体力学に基づき、高流量を発生可能な EHD ポンプの考案および電界解析を用いた評価

従来の EHD ポンプおよび ECF ポンプは流動発生のメカニズムの詳細が未だ解明されていないことなどから、試行錯誤的に電極形状の検討と試作を繰り返すことによって開発が進められている。そのため、高圧力の吐出が可能な EHD ポンプの開発は行われているものの流量に関する検証までは進んでおらず、低い流量でも駆動が可能なマイクロマシンが主な応用先になっている。そこで高流量が吐出可能な EHD ポンプの検討として、流体力学に基づいた EHD ポンプの構造を提案し、提案手法について電界解析を行うことで既存の電極構造と比較することで評価を行うこととした。

#### ②新たな流体駆動源の開発および基礎特性の測定

提案手法に関して電界による解析のみでは実際に高流量化が可能なのか評価を行うことができないため、本研究では提案手法に基づく EHD ポンプを試作し、吐出流量と吐出圧力の測定によって前述の電界解析の結果と合わせて実験にて評価する。

#### ③開発した新たな流体駆動源を駆動力源としたロボット駆動機構の開発

開発した新たな流体駆動源を用い、流体駆動源の特徴である柔軟な動作と電気エネルギーを直接変換する機械的駆動部を用いないシンプルな構造を併せ持つ、新たな流体駆動アクチュエータの提案・開発を行うこととした。また、そのアクチュエータの試験的な応用として生体の動きを参考にした魚型ロボット駆動機構を試作し、駆動させることで EHD 現象の発展の可能性を示す。

## 第3章 EHD ポンプの高流量化

1章2節で述べた通り, EHD 現象の発生メカニズムは明らかになっていないため, 電磁気学的な高流量化に対するアプローチ, は現段階では困難だと言える. 一方で EHD 現象によって流れ出した液体については流体力学で考えることができるため, 既存の流体ポンプと同様の高流量化のアプローチが EHD ポンプによる流動についても有効であると考えた.

そこで, 既存の流体駆動源で行われている高流量化の手法を EHD ポンプに取り入れた電極構造を提案することとした.

### 3.1 高流量化の手法に関する検討

流体力学において流量は単位時間当たりに流路の断面を通過する流体の体積(もしくは質量)と定義されている. よって流量  $Q$ , 流速  $v$ , 断面積  $A$  の関係式は

$$Q[m^3/s] = v[m/s] \times A[m^2] \quad (3.1)$$

であり, 流速を速くするか流路の断面積を広げることで高流量化することが可能である. そのため, 従来の流体ポンプにおける高流量化の手法としては一般的に, 流速の上昇を目的としたポンプ自体の改良による性能向上か流路の断面積の拡大を目的とした複数台のポンプの並列駆動が行われている. ここで, EHD ポンプで流動が発生する原理については電気力学に基づいた様々な理論の複合であると考えられており, いままでに明確にはなっていないものの, 流体の運動には変わらないため, 一般的なポンプでの手法が EHD ポンプにおいても同様に効果があると考えた.

(3.1)式を元に, EHD 現象で発生する流量を向上させる手法については  $v$  を増加する手段として

- ① EHD ポンプ内部の平板電極を直列に多段化することで圧力を向上させる.
- ② 現在使用している作動流体である「HFE-7200」より強い流動が発生する作動流体

を使用する.

Aを拡大する手段として

③EHDポンプの電極幅を広げることで流路の断面積大きくする.

の3個が考えられる.

まず①については、ベルヌーイの定理から動圧力は流量の二乗に比例するため、動圧力を4倍に増やすことで流量を2倍に増やすことが可能である。そのため、EHDポンプの直列多段数を増やし続けることにより高圧力を発揮させ、高流量の吐出は可能である。しかし、吐出時に常に高い圧力が求められることに加え、ベルヌーイの定理の成立条件である層流に関してEHDポンプ内での流れ方については明らかになっていないため選択肢から除外する。次に、②についてはこれまでの著者らの研究グループを含め、様々な研究機関での実験により、液体の種類によって流動の生じ易さが異なることが分かっている。そのため、現在使用している流体より強い流動が発生する液体が存在する可能性はあるものの、本論文の範囲では電極形状に重きを置いているため選択肢から除外する。これらの手法に対して③の手法は、著者らグループの開発したEHDポンプであれば横幅を広げることで流路の断面積が広がるため、電極幅に応じて吐出流量が増加する可能性があり、上記の2つの手段と比較して最も効果が期待できる。なお、正極と負極の間隔を広げることによっても流路断面積は増加するため流量が増加するように思えるが、これまでの研究<sup>34)</sup>から電界強度が同じであれば吐出される流量・圧力が等しくなることが分かっており、電極間隔の拡大によって低下する電界強度を補うためにより高い電圧の印加が必要になることに加え、流れる電流も増加する。よって、液体の絶縁耐圧による印加可能電圧の限界や、使用する電源の大型化、消費電力の増加など様々な問題が考えられるため選択肢から除外することとした。

以上のことから本研究におけるEHDポンプの高流量化の手法としては③のEHDポンプの電極幅を増加させることによる流路断面積の拡大を用いることとした。

### 3.1.1 EHD ポンプの拡幅化による高流量化

EHD ポンプを高流量化するにあたり前項で述べた通り EHD ポンプの電極幅を広げることによって流路断面積を拡大し、吐出流量を増やす構造の考案を行うこととした。ここで EHD ポンプの基本電極構造を図 3-1 に示す。EHD ポンプは正極側平板電極の上部に傾斜させた負極側平板電極を配置した構造であり二枚の電極の厚みは等しい。ここで、EHD ポンプ内の電極幅  $w$  を拡幅することで (3.2) 式に従い流量が増加すると考えられる。

$$Q[m^3/s] = v[m/s] \times d[m] \times w[m] \quad (3.2)$$

ただし、実際に駆動源として応用する際には配管等につなぐ設計となる場合が多く、図 3-2 に示すように流路の急拡大、急収縮は圧力損失に繋がる。そのため、流路の幅と配管の大きさによっては図 3-3 に示すようなテーパ形状を施すことが必要となる。

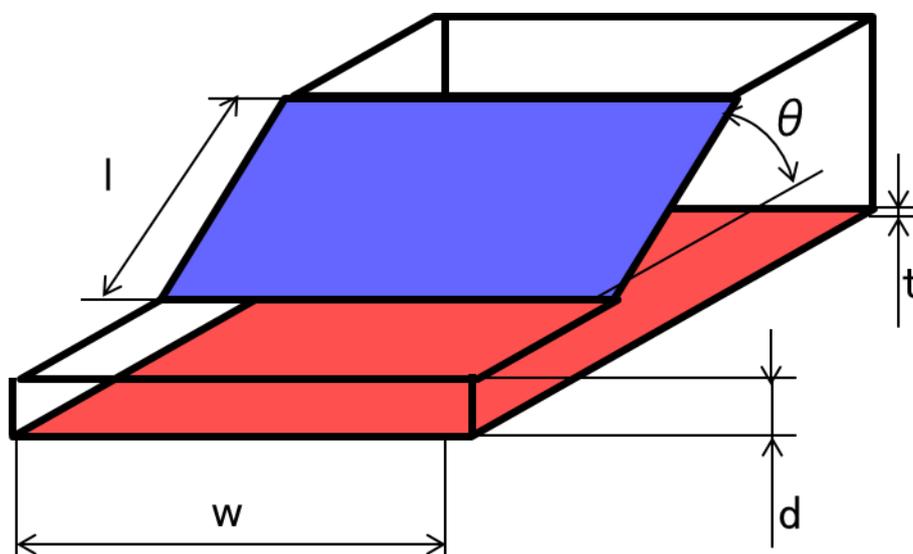


図 3-1 基本電極構造

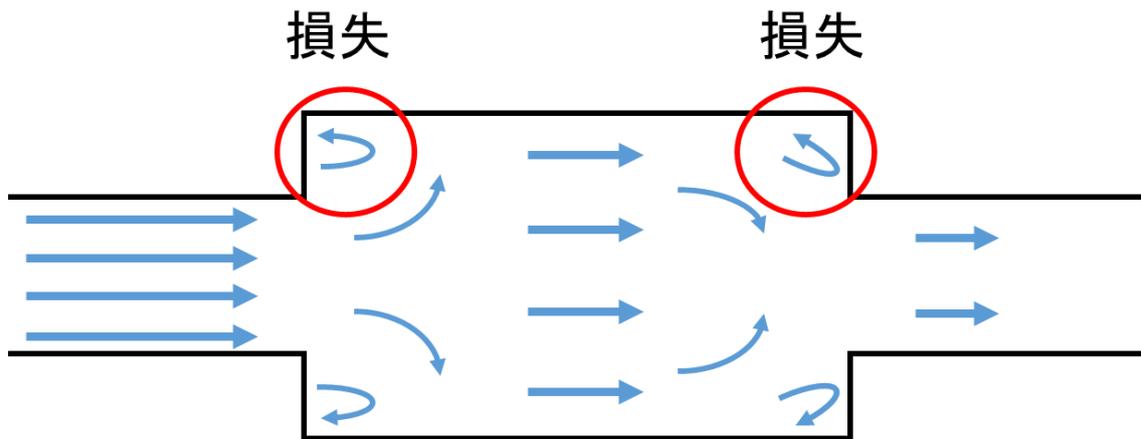


図 3-2 流路の急拡大・急収縮による圧力損失

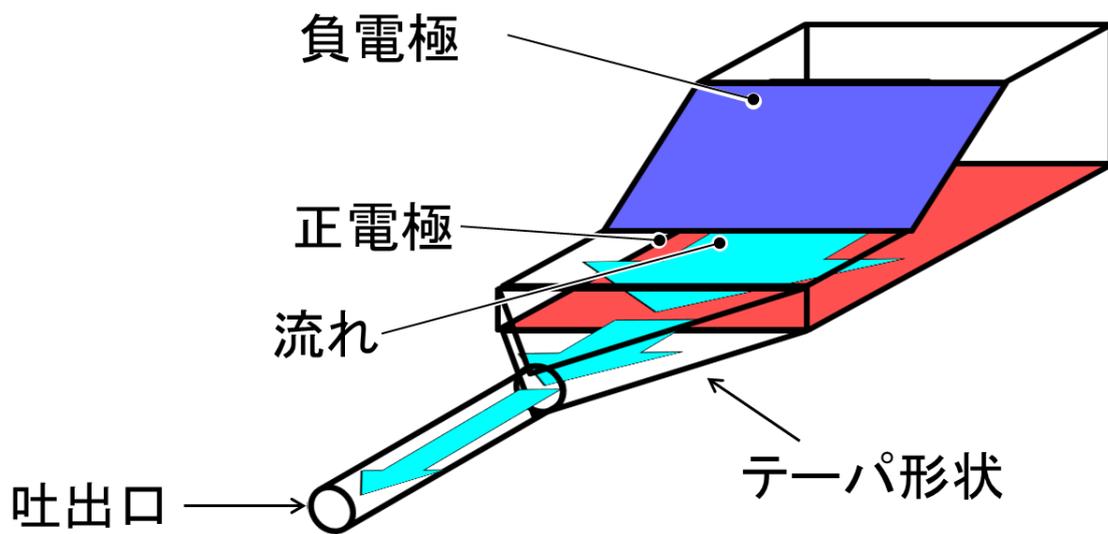


図 3-3 流路のテーパ形状

### 3.1.2 EHD ポンプの並列化による高流量化

電極の拡幅化と同様に流路断面積を増加させる手段として、EHD ポンプを平行接続することを考えた。これは図 3-1 に示した電極形状を図 3-4 に示すように並列させて流路を接続させるだけの構造であり、(3.3)式に従いポンプの並列数  $n$  および電極幅  $w$  に応じて流量の増加が見込める。

$$Q[m^3/s] = v[m/s] \times d[m] \times n \cdot w[m] \quad (3.3)$$

最も簡易的な設計としては EHD ポンプを 2 台用意して流路を合流させるだけで高流量化が期待できるが、並列数が増す場合、配管の合流・分離による管内の流れの損失を考慮する必要がある。

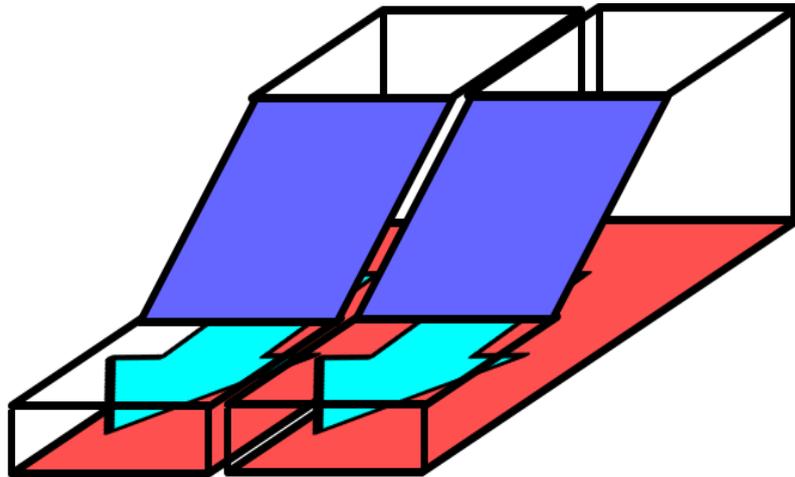


図 3-4 電極構造の並列化

## 3.2 考案したポンプ形状における発生電界の解析

2種類のEHDポンプの高流量化の手法を考案し、EHDポンプの拡幅化に関してはテーパ形状の流路が必要な場合があり、並列化では配管の合流・分離による流れの損失を考慮する必要があるため、設計条件を加味してどちらか、または両方の方法を選択することで高流量化が可能となると考えられる。ここで、我々の研究グループではこれまでEHDポンプの流量に関して考慮していないため、電極幅や配線の位置に関しての基準や制約は無く、経験則で設計を行っていた。しかし、高流量化を考慮した場合電極幅およびポンプの並列数が設計時に重要であることに加え、配線から発生する電界によって電極間の電界分布が乱れる可能性があることから、ポンプ並列時に配線の位置に関する考慮が必要となる。そこで、配線部で発生する電界が電極間での電界分布に与える影響、および電極幅の関係を3次元静電界解析によって解析し考察する。

### 3.2.1 配線の影響がない場合の電界解析

配線部の電界と電極幅の関係を解析するにあたり、まずは配線の影響がない場合の電界分布の解析を行うこととした。先行研究よりEHD現象のメカニズムは明らかではないものの、2枚の電極間に非対称な電界分布が発生することで一方向の流動が発生することが2次元静電界解析から分かっている。<sup>36)</sup>そのため同じ電極構造で3次元静電界解析を行い、立体形状での電界分布を明らかにする。

#### (1) 解析モデルおよび解析条件

電界解析には有限要素法を用いた解析ソフト(フォトン製, VOLT ST ver.9.5)を用いた。解析対象は図3-5に示すように底面の正極側平板電極とその上部1[mm]の位置に30[deg]傾斜させた負極側平板電極を対向するように2枚配置し、正極と負極の間に絶縁性液体で満たした流路を設けた構造であり、レジンで封入した状態を模擬した。

実際の解析モデルを図 3-6 に示す. 解析条件を表 3-1 に電極寸法を表 3-2 に示す. 電極の材質は真鍮, 絶縁性液体の誘電率を 7.35, レジンの誘電率を 3.5 とし, EHD ポンプで使用する範囲内のおよそ最小値と最大値である 500[V]と 15[kV]の 2 パターンの電圧を右側の負極を GND として正極に付与した条件で電界解析を行った.

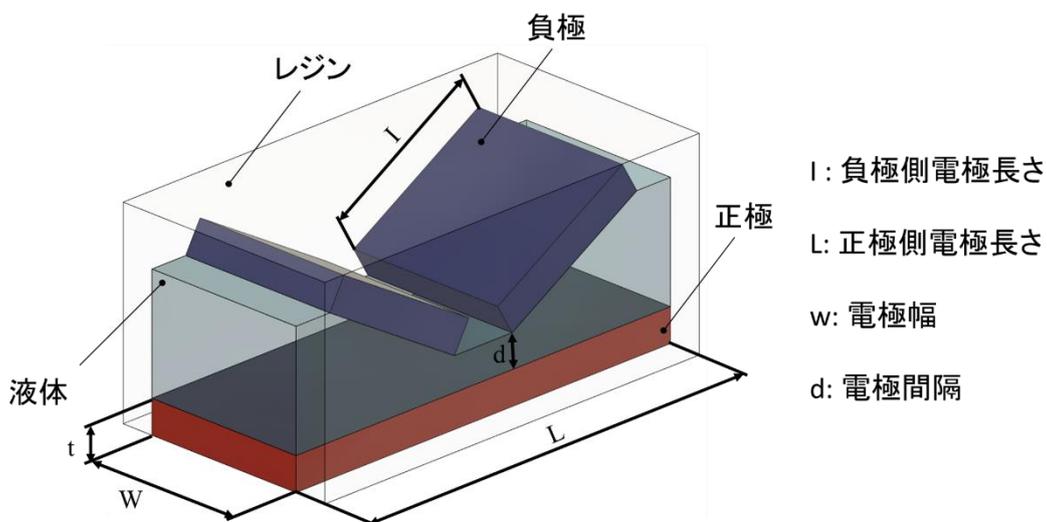
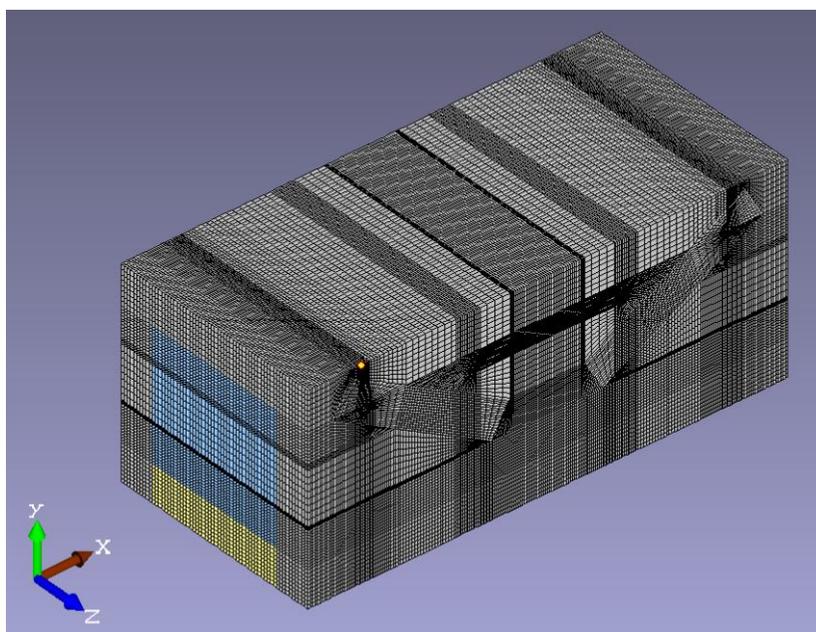


図 3-5 解析対象のモデル形状



3-6 配線無し電極構造の有限要素モデル

**表 3-1 電界解析条件**

印加電圧	[kV]	0.5(min)or15(max)
絶縁性流体の比誘電率		7.35
レジンの比誘電率		3.5
電極の材質		真鍮(電気伝導率 $5.0e+4$ [S/m])
要素数		約 100 万
メッシュ形状		四角形
計算方法		有限要素法
解析式		マクスウェル方程式
境界条件		自然境界条件

**表 3-2 電極寸法**

項目	記号	寸法[mm]
+電極長さ	L	13
幅	W	4
厚さ	t	1
電極間距離	d	1
GND 電極長さ	l	5

## (2) 解析結果

15[kV]印加時のモデル全体の電位分布を図 3-7 に示す。電極間の電位分布を確認するため、図 3-8(a)に示すように電極構造を Z 軸方向(X-Y 平面)と、図 3-8(b)に示すように X 軸方向(Y-Z 平面)のうち 2 枚の電極が最も接近する位置(A-A 断面)で断面を取り解析結果を確認した。まず図 3-9(a)が解析結果を Z 軸方向から見たものであり、電極および流路の位置を分かりやすくするために白線で強調している。また、電極構造面までのレジンは表示しない設定を適用している。この図から正極・負極の電極間距離が広いところから狭くなるにつれて電界分布が密になり、非対称な電界が発生していることが確認できる。また、Z 軸方向における電極中央断面の解析結果が図 3-9(b)に示すものであり、図 3-9(a)と同様の電界が発生していることが確認できる。さらに X 軸方向 A-A 断面から見たものが図 3-9(c)に示す解析結果であり、ほぼ一樣な電界分布となっていることが確認できる。X 軸方向 A-A 断面における電位分布のばらつきに関して図 3-10 に示すように、メッシュの境での負極から正極までの電位を 9 か所で抜き出し、図 3-11 に示すように負極からの距離に対する電位の変化をグラフにした。グラフから分かる通り 9 か所の電位分布にばらつきはほとんどなく、両端の右 4、左 4 において他の電位分布と異なり負極から 0.05[mm]から 0.55[mm]の区間での電位が 0.3[kV]高い値を示した。この結果より電極間が最も近くなる箇所における電位はほぼ一樣であり、電極両端でわずかに強くなることが分かった。

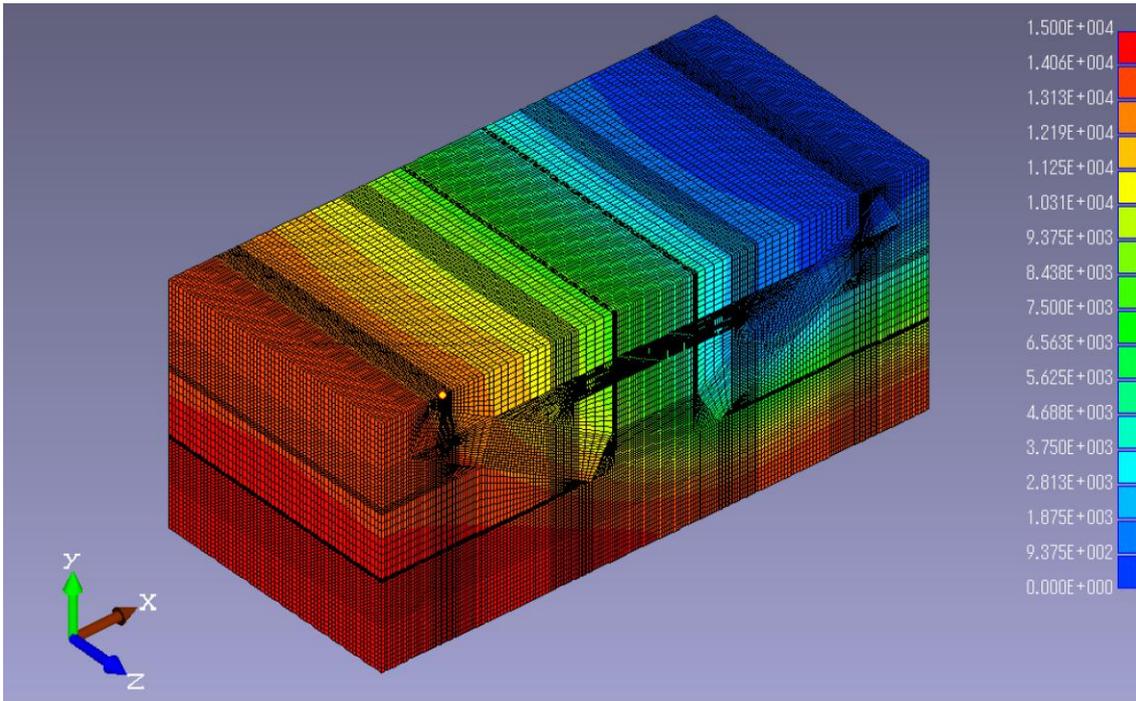


図 3-7 モデル全体の電界解析結果

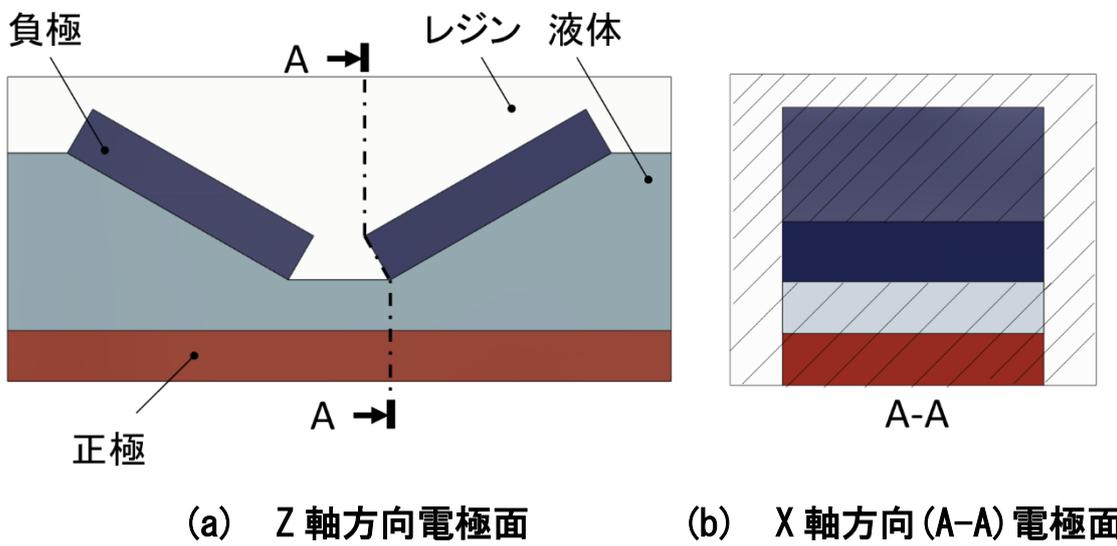
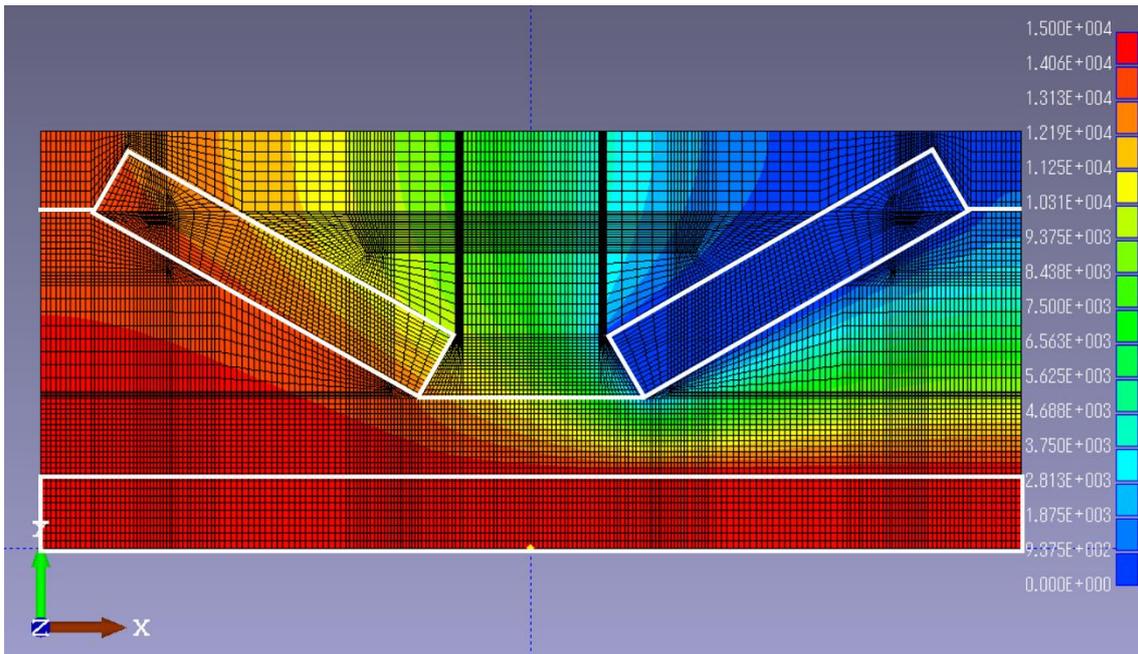
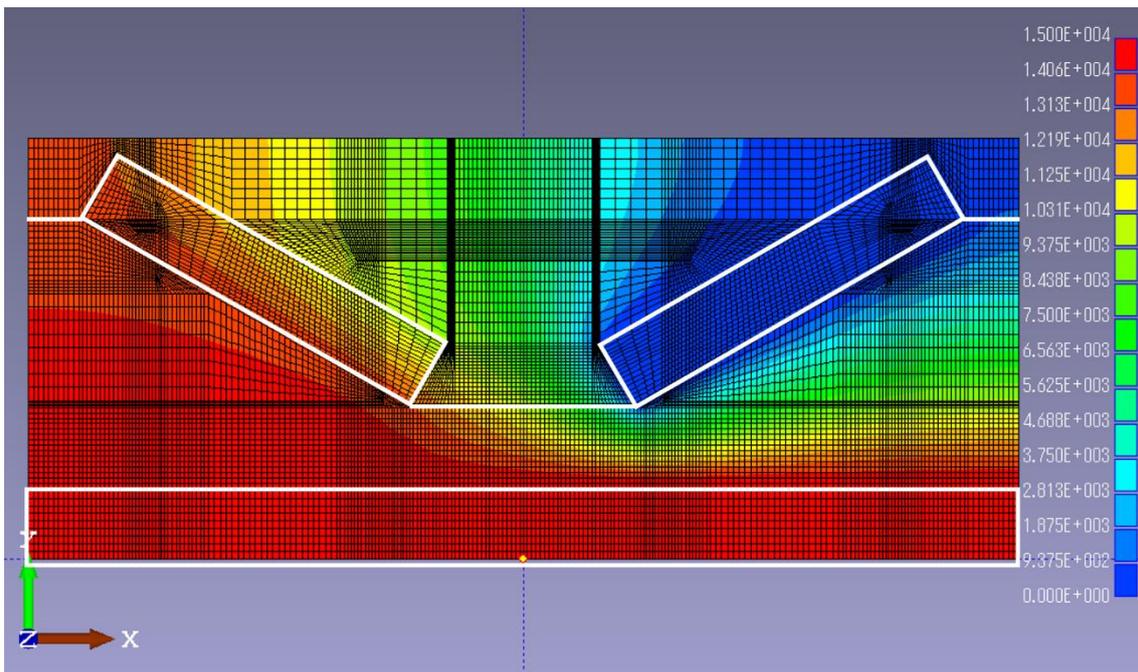


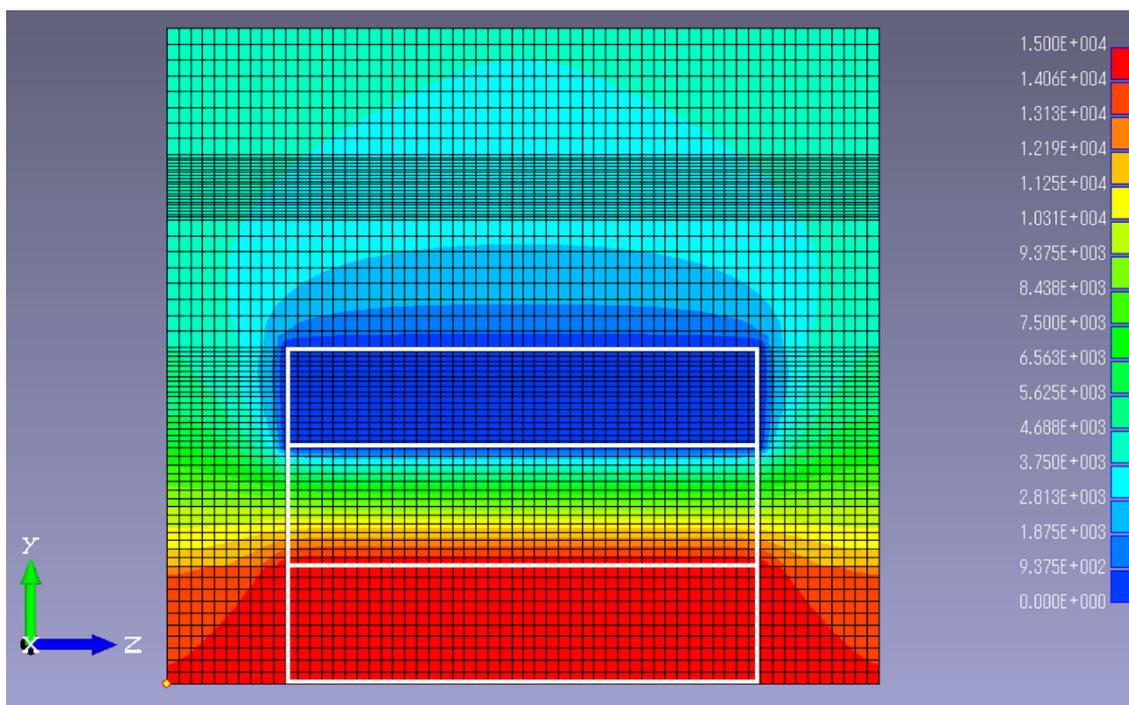
図 3-8 電極構造視点モデル



(a) Z 軸方向電極面の電位分布



(b) Z 軸方向電極面(中央断面)の電位分布



(c) X 軸方向 A-A 断面の電位分布

図 3-9 電界解析結果(電位分布)

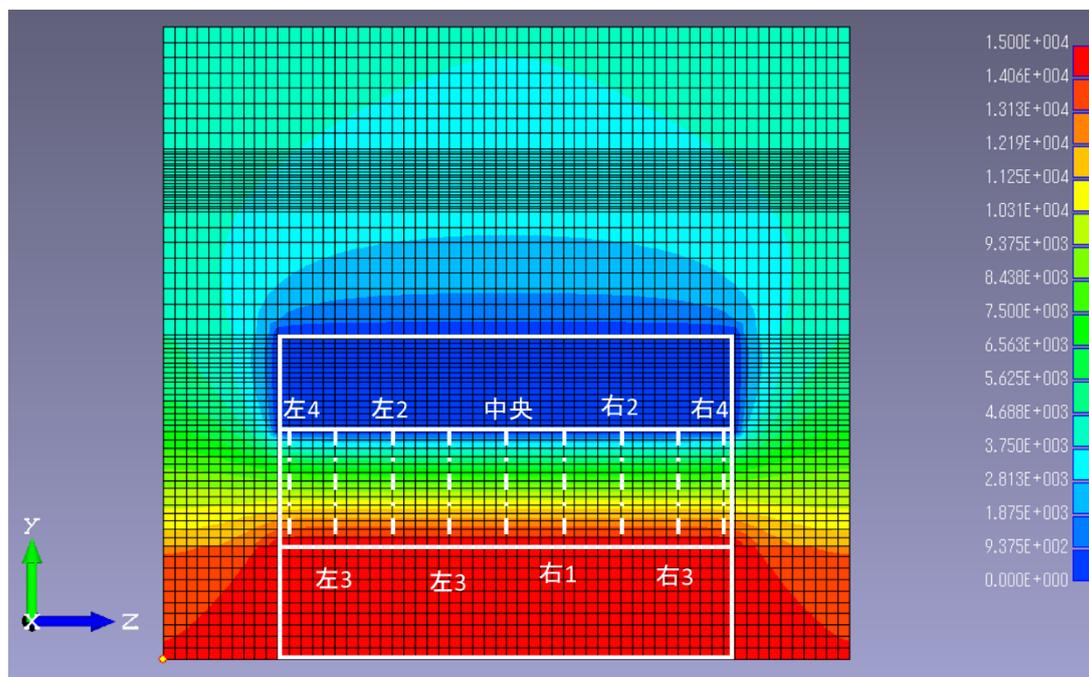


図 3-10 電位分布記録箇所

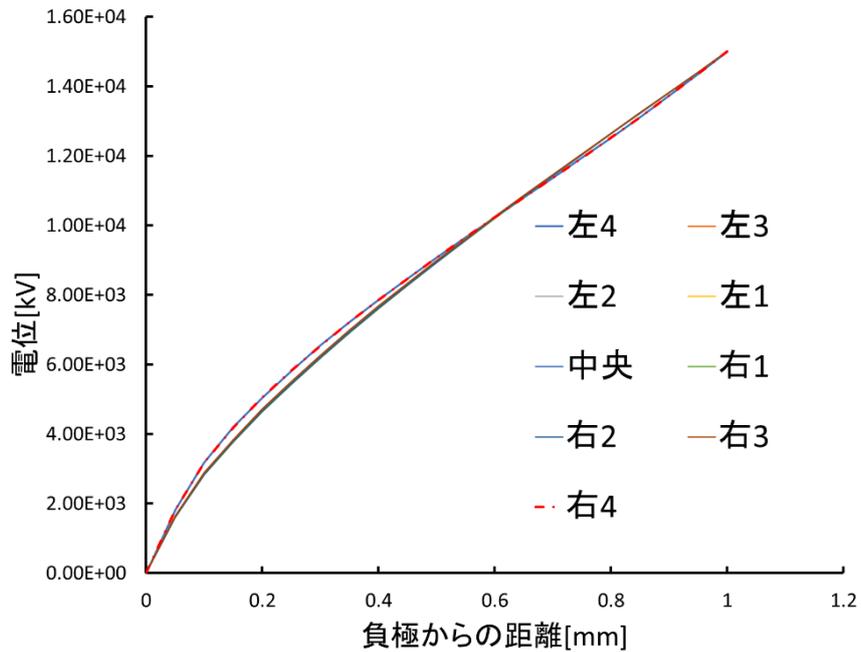
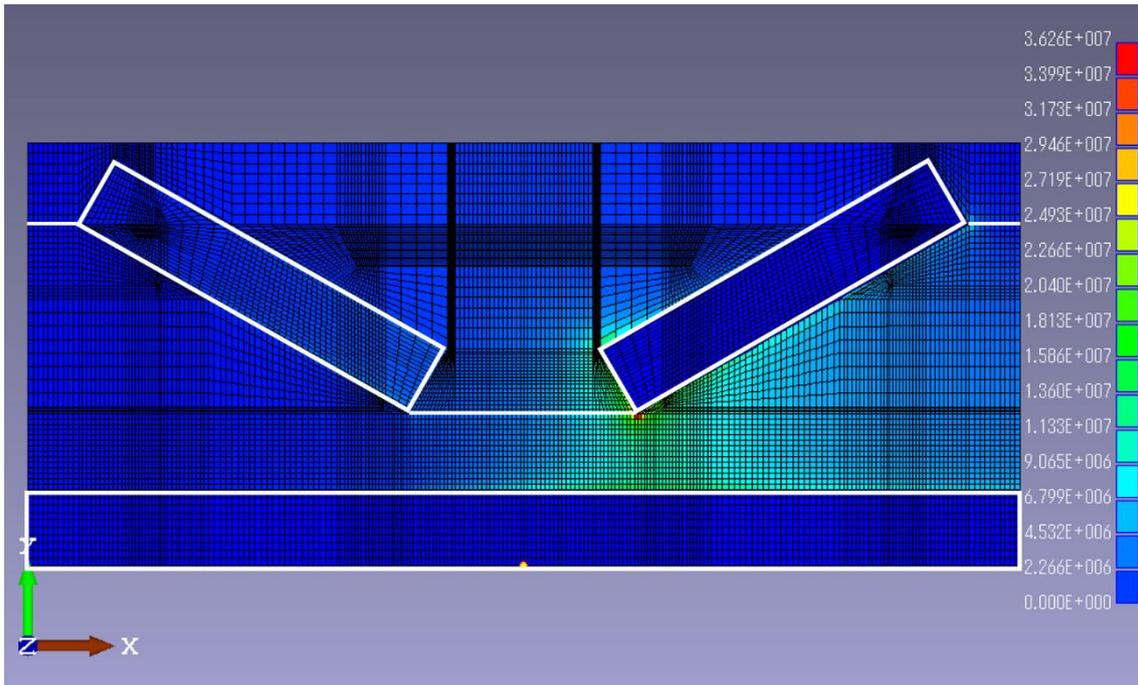
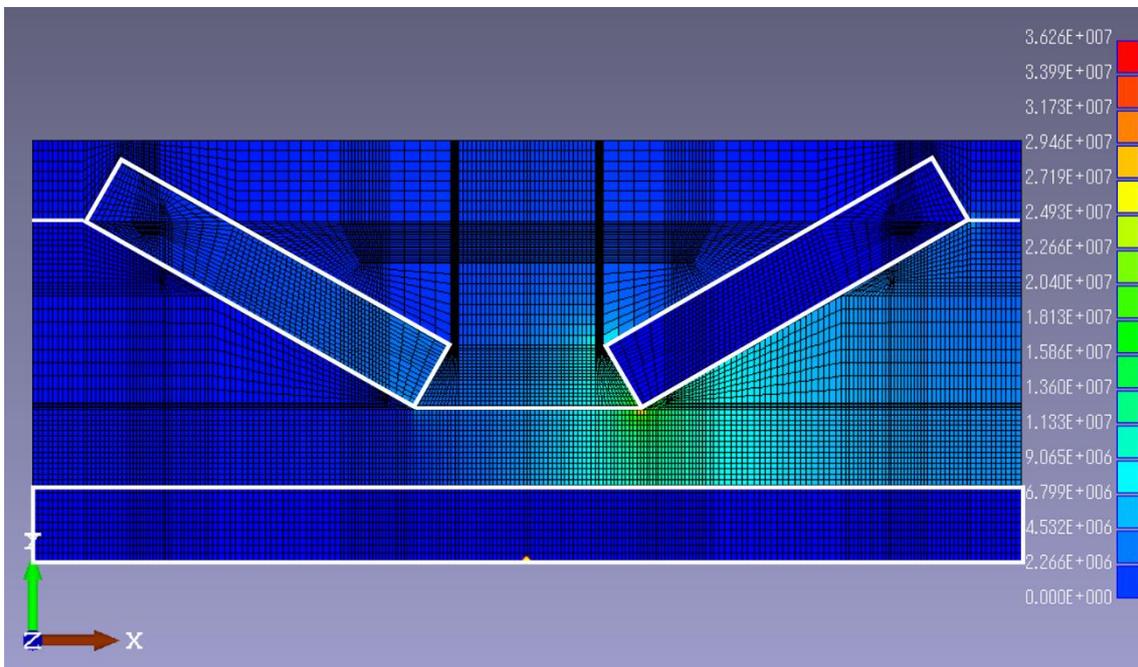


図 3-11 記録箇所における電位分布

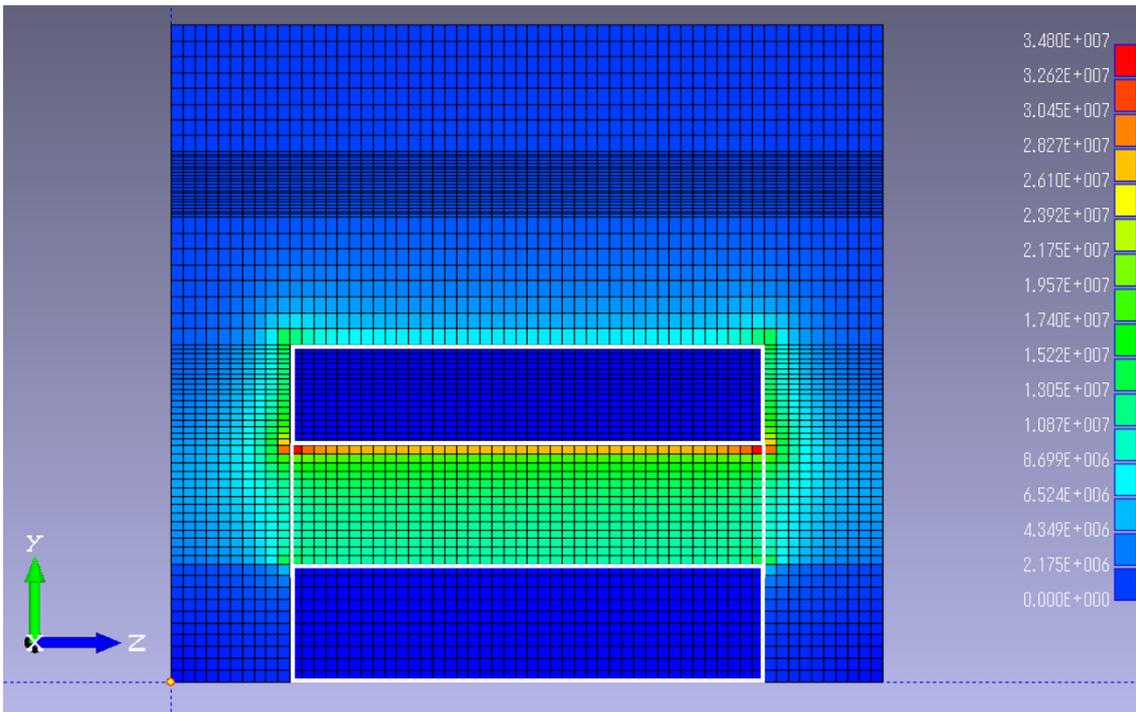
次に、電界強度の解析結果を確認するために、図 3-9 (a), (b), (c)と同じ面での電界強度の解析結果を 3-12(a), (b), (c)に示す。図 3-12(a)の図より電極間隔が広い所から狭くなるにつれて電界強度は増加し、正負の電極間隔が最も狭くなる箇所で電界強度は最大値を示した。また、図 3-12(b)(c)において正極側から負極側に向かい電界強度は高くなる傾向を示し、電極両端で最も強い電界が発生し、電極中央での電界強度と比較して約 440[V/m]高い値を示した。しかし、電極端から 0.3[mm]以降の電界強度は約 3500[V/m]であり一様であることが分かった。これは電極端のエッジ部分で電界強度が強く表れたためであり、EHD現象の流動が両端でわずかに強くなる可能性を示唆しているが、比率でいえば 1.14 倍程度であるためほとんど差はないと考えられる。よって理想的な電界分布が発生する電極構造においては、先行研究<sup>36)</sup>で示されたように流動は電極間隔が広い所から電界強度が最も強い負極先端に向けてほぼ偏りなく発生すると考えられる。



(a) Z 軸方向電極面の電界強度



(b) Z 軸方向電極面 (中央断面) の電界強度



(c) X 軸方向 A-A 断面の電界強度

図 3-12 電界解析結果(電界強度)

次に 500[V]印加時の解析結果を図 3-13 に示す. 図から分かる通り, 右のカラーバーのスケールが異なる以外は同様の結果となった. よって以降の解析においては 15[kV]印加時の解析のみを行う.

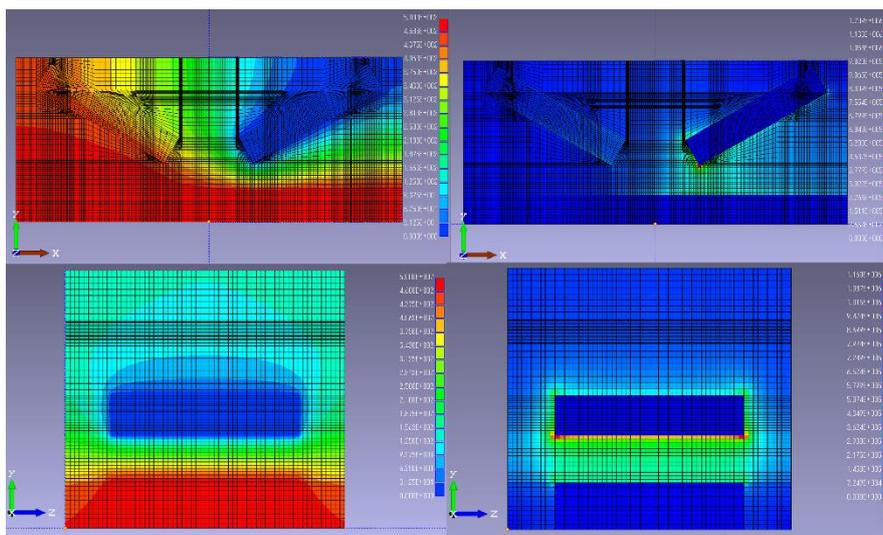


図 3-13 電界解析結果(500[V])

以上の解析結果より、外部からの電界による影響を受けていない場合の EHD 現象によって一方向の流動が発生する電極形状での理想的な電界分布としては、電極の Z 軸側面では電極間隔が狭くなるほど電界密度が高まり、X 軸方向では最も電極間隔が狭い所の電位分布および電界強度がほぼ一樣になることが示された。よって、これ以降の配線が与える影響の解析においては、本解析結果と比較してどの程度影響を受けているかを評価することとした。

### 3.2.2 配線による電界が与える影響の解析

3 章 2 節 1 項において、EHD 現象により一方向への流動が確認されている電極構造における、外部からの影響を受けていない状態での電界分布を明らかにした。ここで、実際の EHD ポンプでは電極ごとに通電用の配線を施す必要があり、電磁気学で考えると配線部で発生する電界は電極間で発生する電界分布に影響を与える可能性が高い。ここで、これまで電極幅に対する検討がほとんど行われていないことから、電極幅に対する配線が与える影響は未知数であり、高流量型 EHD ポンプの考案に際し基準となる電極幅が定めることができない。そこで、電極構造の両サイドにそれぞれ+電極と GND 電極の配線があると仮定した場合に、それぞれの配線によって発生する電界が与える影響を明らかにし、電位分布のばらつきを見ることで配線の影響を軽減できる EHD ポンプの電極幅について検証を行うこととした。

#### (1) 解析モデルおよび解析条件

EHD ポンプの設計を行う際、流路の構造や配線の位置にはある程度自由度があり、組込む対象に合わせて構造を変えることが可能であるため、配線を実際のポンプに合わせることは非常に困難である。そこで、EHD 現象の発生に対して不利な状況の配線を想定し解析を行うことで、設計条件が厳しい状況下でも性能を発揮可能な

電極幅の基準を定めることとした。電界解析には 3 章 2 節 1 式と同様に有限要素法を用いた解析ソフトを用いた。解析対象のモデル形状を図 3-14 に示す。図のように配線による影響を検討するために図 3-5 に示した基本電極構成の電極間隔が最も狭い箇所の両端に間隔を 0.1[mm]開けて電極と同じ材質と定義した配線部を配置し、レジンで封入した立体形状とした。実際の有限要素モデルを図 3-15 に示す。電極サイズは表 3-3 に示すように、電極幅  $W$  を 1[mm], 4[mm], 6[mm]の 3 パターンとし、配線部は電極から 0.1[mm]の箇所に設けた。また、解析条件は表 3-1 に示した通りである。配線を電極構造よりも高い位置まで伸ばしている理由としては、図 3-16 の様に流路を折り曲げることで電極の密集度を上げ、体積当たりの吐出性能を高める EHD ポンプの設計を行う場合を想定している。このような構造の場合、ポンプを縦断する形で配線を行う可能性があるため解析モデルの配線も同様の配置とした。

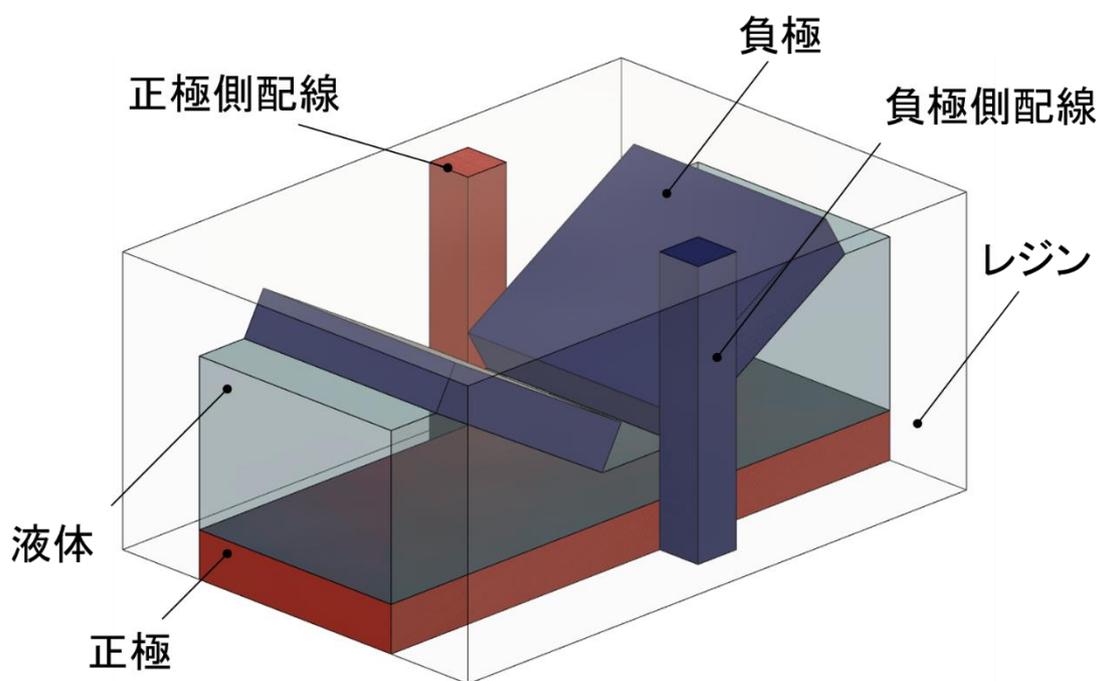


図 3-14 解析対象のモデル形状

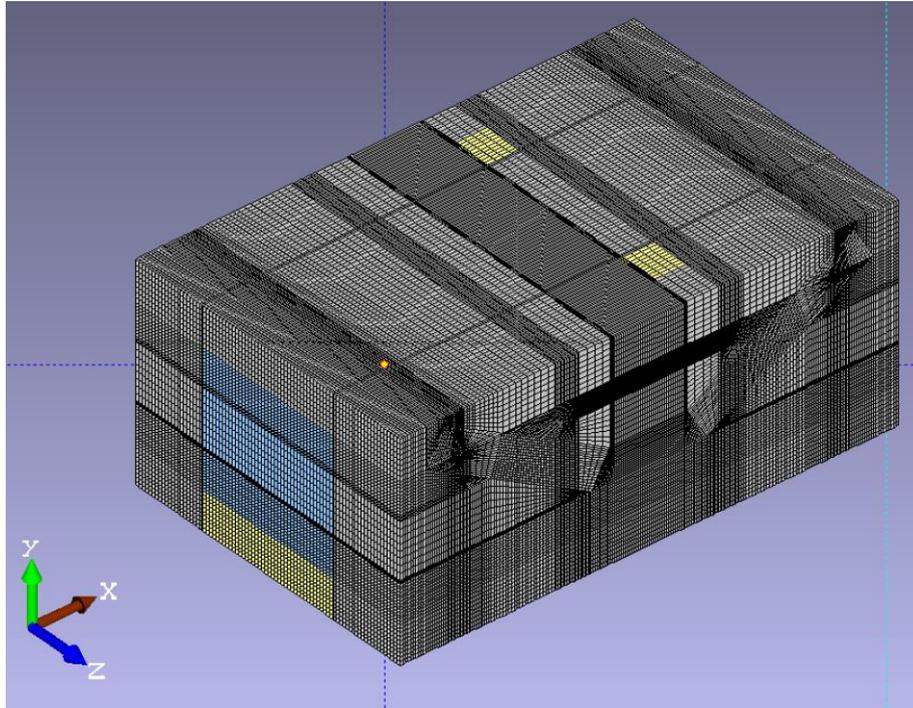


図 3-15 有限要素モデル

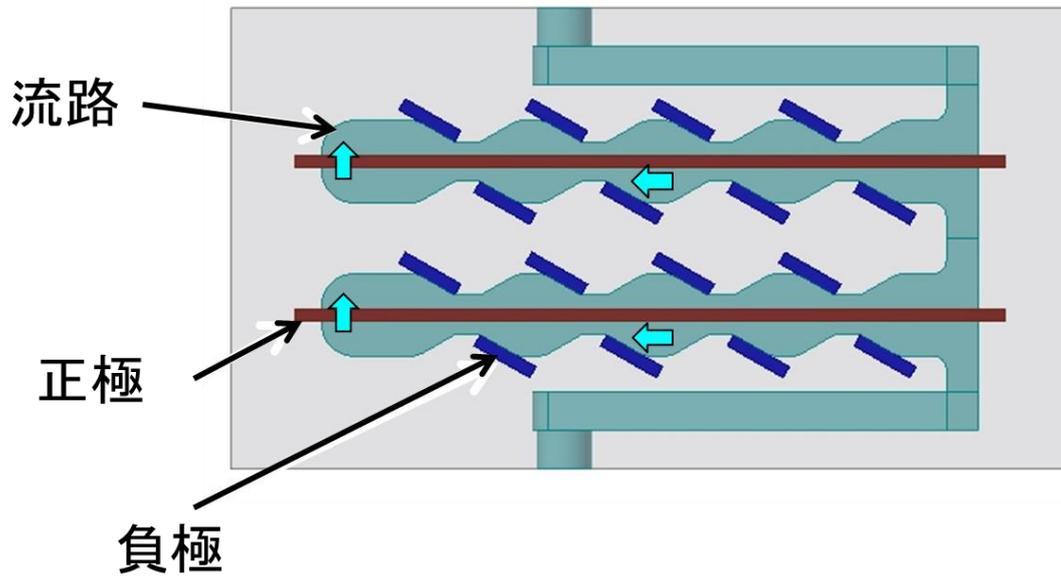


図 3-16 EHD ポンプの構造例

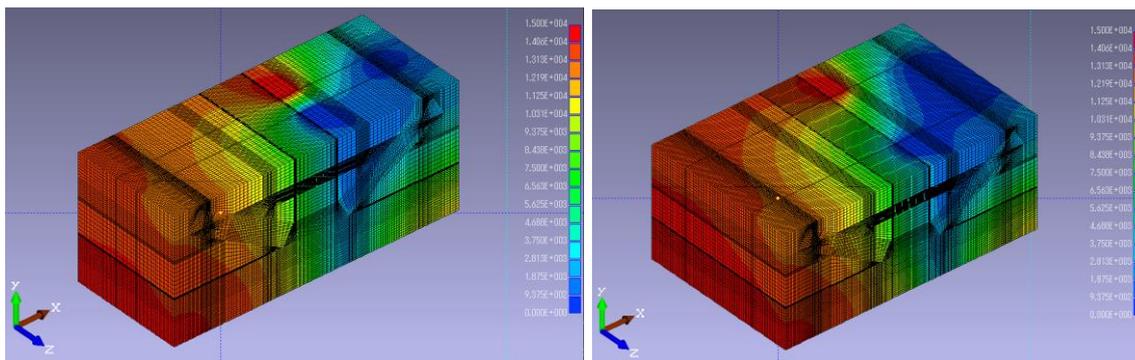
**表 3-3 電界解析条件**

項目	記号	寸法[mm]
正電極長さ	L	13
幅	W	1, 4, 6
厚さ	t	1
電極間距離	d	1
負電極長さ	l	5

## (2) 電界解析結果および考察

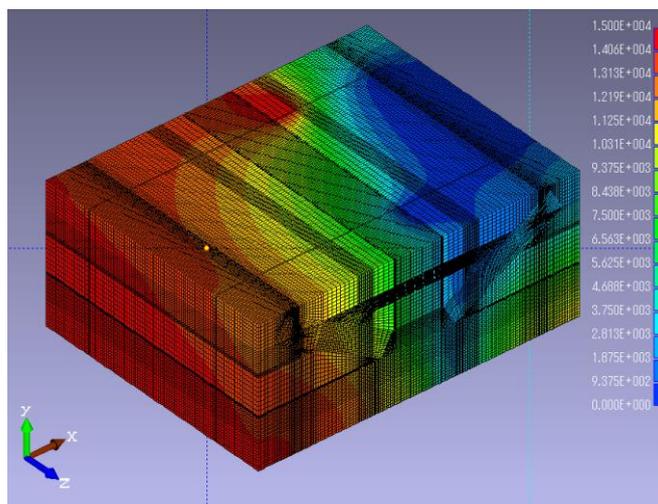
図 3-17 に 15[kV]印加時の電界解析結果を示す。それぞれの要素数は幅 1[mm]で 92 万, 4[mm]で 143 万, 6[mm]で 178 万であり, 電極間の電位分布を確認するため, 図 3-18(a)に示すように電極構造を Z 軸方向(X-Y 平面)と, 図 3-14(b)に示すように X 軸方向(Y-Z 平面)のうち 2 枚の電極が最も接近する位置(A-A 断面)で断面を取り解析結果を確認した。まず図 3-19 が解析結果を Z 軸方向から見たものであり, 電極および流路の位置を分かりやすくするために白線で強調している。また, 電極構造面までのレジン表示しない設定を適用している。解析結果から配線部の電界により, 電極構造で発生する電位分布に影響を与えていることが確認できる。この電位の乱れは, 図 3-20 に示す Z 軸方向における電極中央断面の解析結果から分かるように Z 軸中央に進むほどに軽減され, 電極幅が広いほど電位分布が理想電界での分布に近づくことが明らかになった。よって X 軸方向 A-A 断面における電位分布のばらつきについて図 3-10 と同様に電極間での電位を抜きだし, 比較することで配線の電界による電位分布への影響度合いを検証することとした。図 3-21 に解析結果および電位分布記録箇所を示す。比較方法はまず配線無しの電極構造, 電極幅 1[mm], 4[mm], 6[mm]の中央部の電位を抜き出しそれぞれで比較を行う。その後各電極幅での電位分布のばらつきをグラフ化し影響度合いを検討することとした。この時, 電極幅 1[mm]での記録箇所は電極中央から左右に 0.1[mm]毎に 4 か所ずつ, 幅 4[mm]での記録箇所は中央

から左右に 0.5[mm]の位置で 1 か所, 0.8「mm」の位置で 1 か所, さらに 0.2[mm]毎に 5 か所と左右の端で 1 か所ずつ, 幅 6[mm]では中央から左右に 0.5[mm]毎に 3 箇所 その後は幅 4[mm]と同様のか所とし, それぞれ中央から端に向かって番号を割り振った.



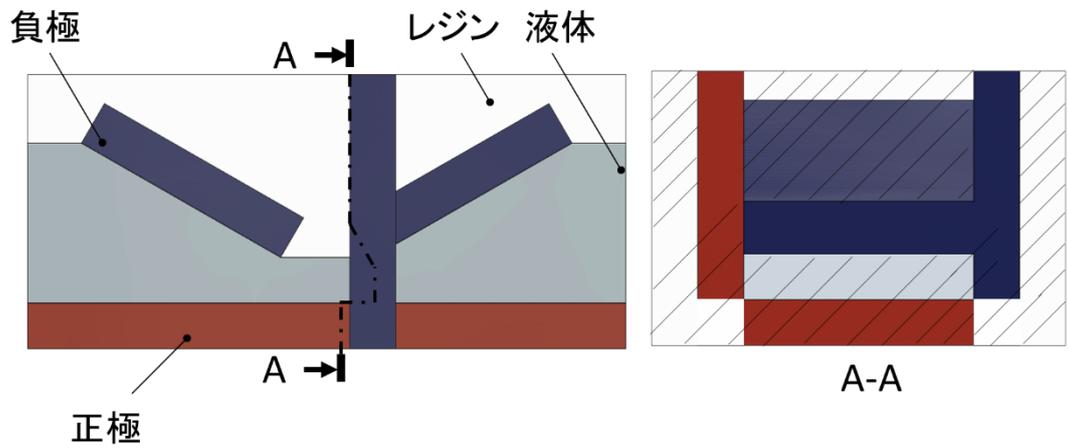
(a) 電界解析結果(幅 1[mm])

(b) 電界解析結果(幅 4[mm])



(c) 電界解析結果(幅 6[mm])

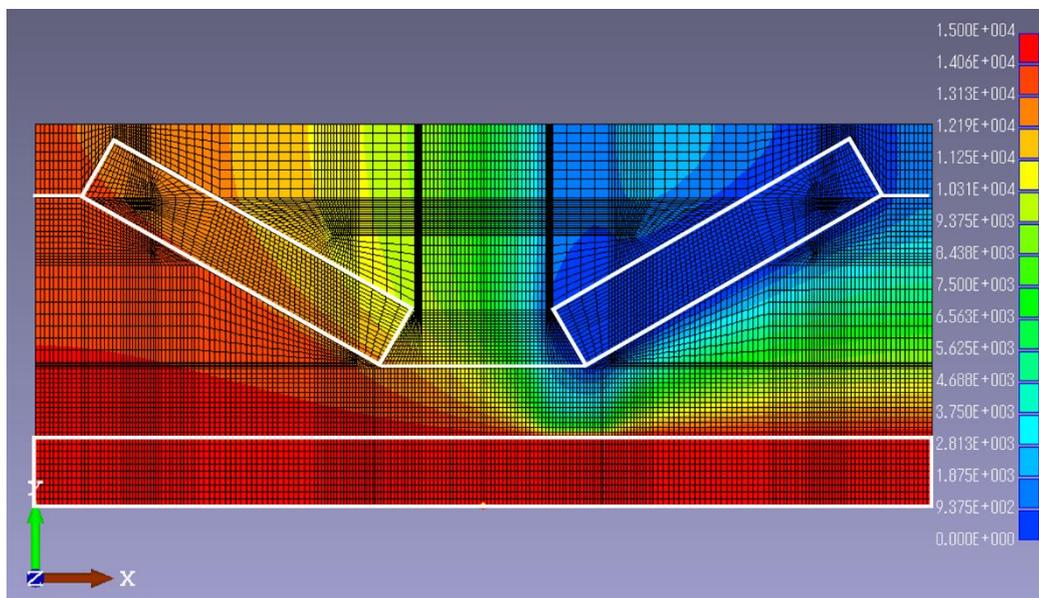
図 3-17 配線を含んだ場合の電界解析結果



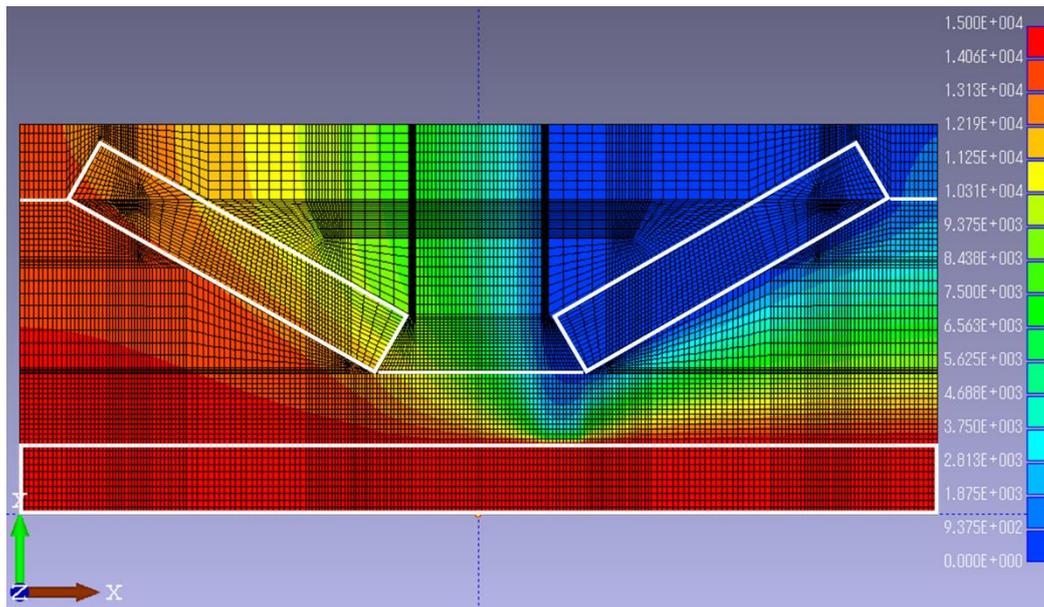
(a) Z 軸方向電極面

(b) X 軸方向 (A-A) 電極面

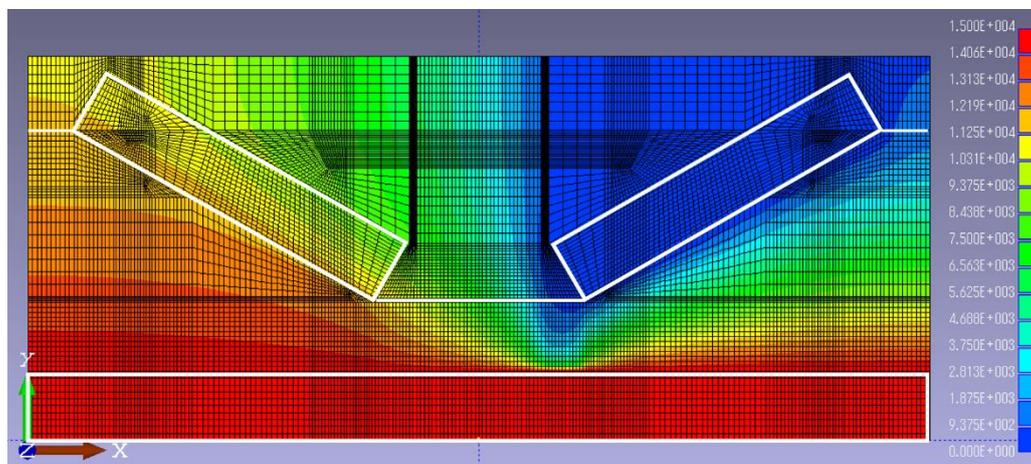
図 3-18 電極構造視点モデル



(a) Z 軸方向電極面の電位分布 (幅 1 [mm])

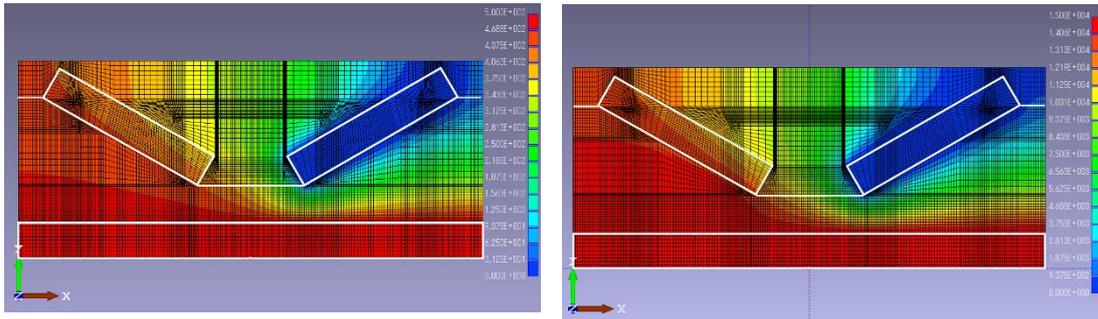


(b) Z 軸方向電極面の電位分布 (幅 4 [mm])



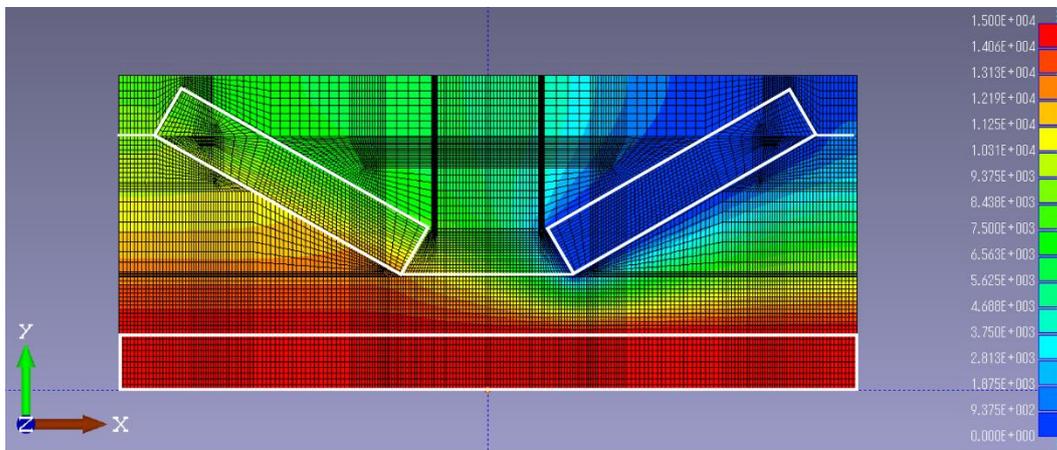
(c) Z 軸方向電極面の電位分布 (幅 6 [mm])

図 3-19 電界解析結果 (Z 軸方向電極面の電位分布)



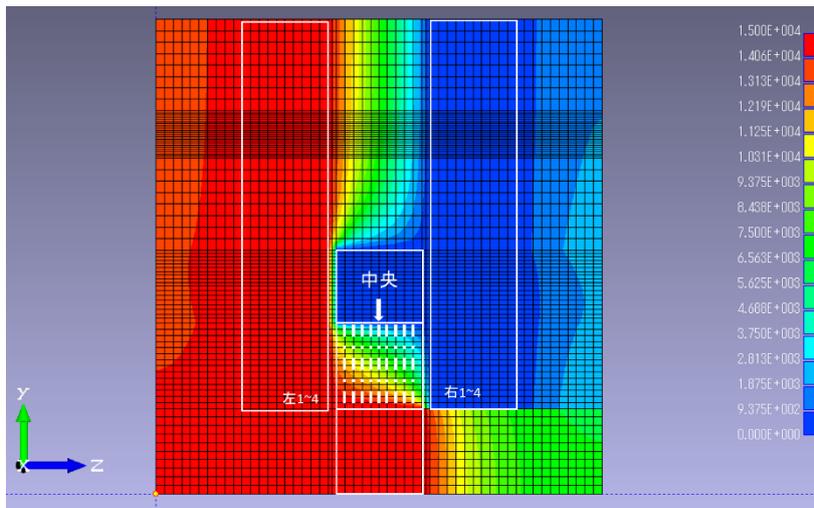
(a) 電位分布 (幅 1 [mm])

(b) 電位分布 (幅 4 [mm])

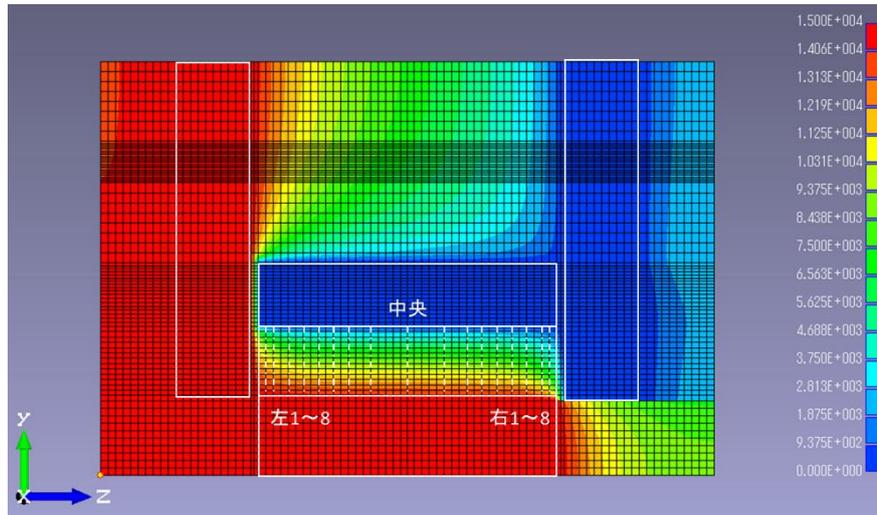


(c) Z 軸方向電極面の電位分布 (幅 6 [mm])

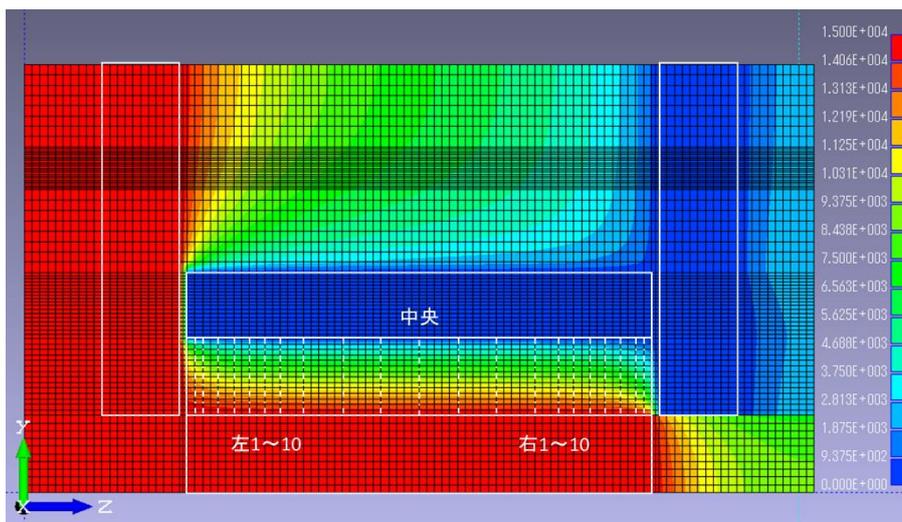
図 3-20 電界解析結果 (Z 軸中央の電極面の電位分布)



(a) X 軸方向 A-A 断面の電位分布 (幅 1 [mm])



(b) X 軸方向 A-A 断面の電位分布 (幅 4 [mm])



(c) X 軸方向 A-A 断面の電位分布 (幅 6 [mm])

図 3-21 電界解析結果および測定箇所

まず、各電極構造における中央部での負極との距離に対する電位分布を図 3-22 に示す。グラフから分かる通り、電極幅 4[mm]、6[mm]では配線が無い場合と同様の電気分布となった。一方で電極幅 1[mm]では既に異なる分布傾向を示しており、電極幅

1[mm]では理想的な電位分布は全く得られないことが分かる。よって電極幅 4[mm]と 6[mm]の分布のみをグラフ化検証を続けることとした。図 3-23 に幅 4[mm]での電位分布を図 3-24 に 6[mm]での電位分布を示す。グラフから幅 4[mm], 6[mm]どちらのグラフにおいても中央部に近いほど電位分布は理想電界と同じ傾向を示しており、左右から5番目の測定か所つまり電極の端から0.8[mm]の距離からばらつきが大きくなっていることから、配線の電界による影響を強く受けていると考えられる。よって電極幅 4[mm]と 6[mm]では同じ距離だけ影響を受けており電極の端から 1[mm]以降の距離では理想電界に近い傾向の電位分布を得られることが分かる。このことから電極幅全体に対する配線の影響を受ける幅の割合を算出し、得られる理想電界の割合  $y$  と電極幅  $W$  の関係式(3.2)式を割り出した。また、この式をグラフにしたものを 図 3-25 に示す。

$$y = \frac{W - 2.0}{W} \times 100 \quad (3.2)$$

(3.2)式およびグラフより電極幅が 10[mm]であれば、80 パーセントの理想電界を得ることが可能である。よって EHD ポンプの高流量化における電極幅を 10[mm]と定める。

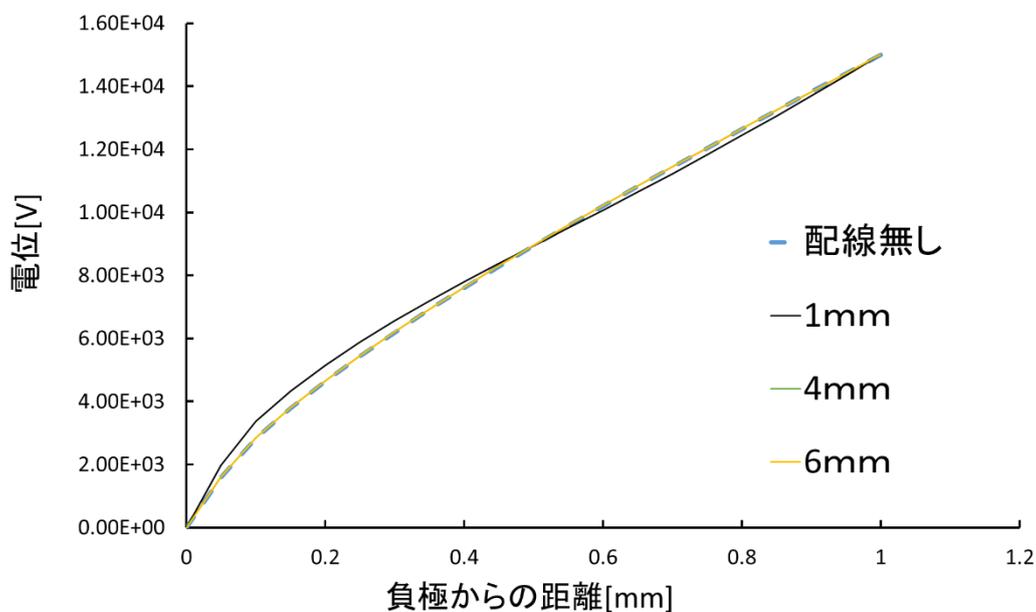
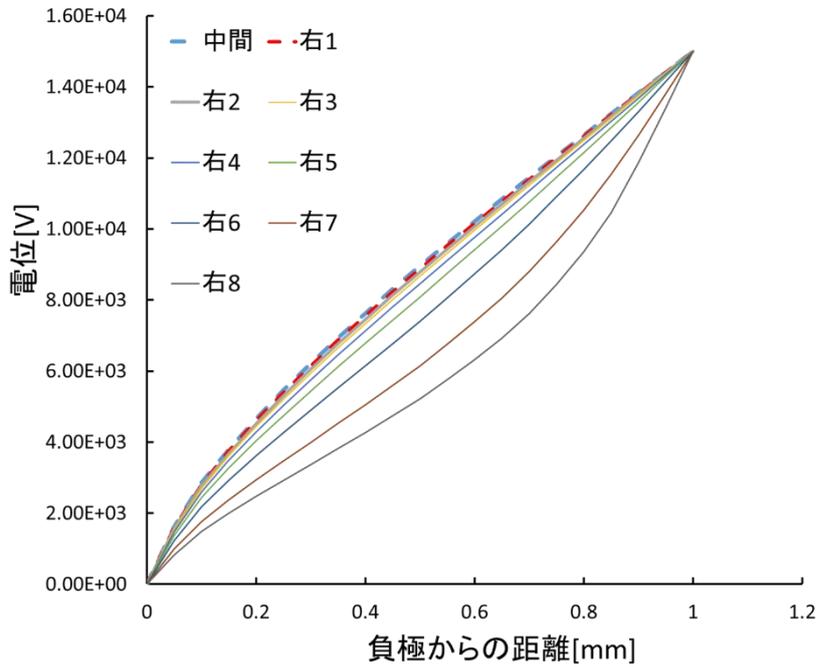
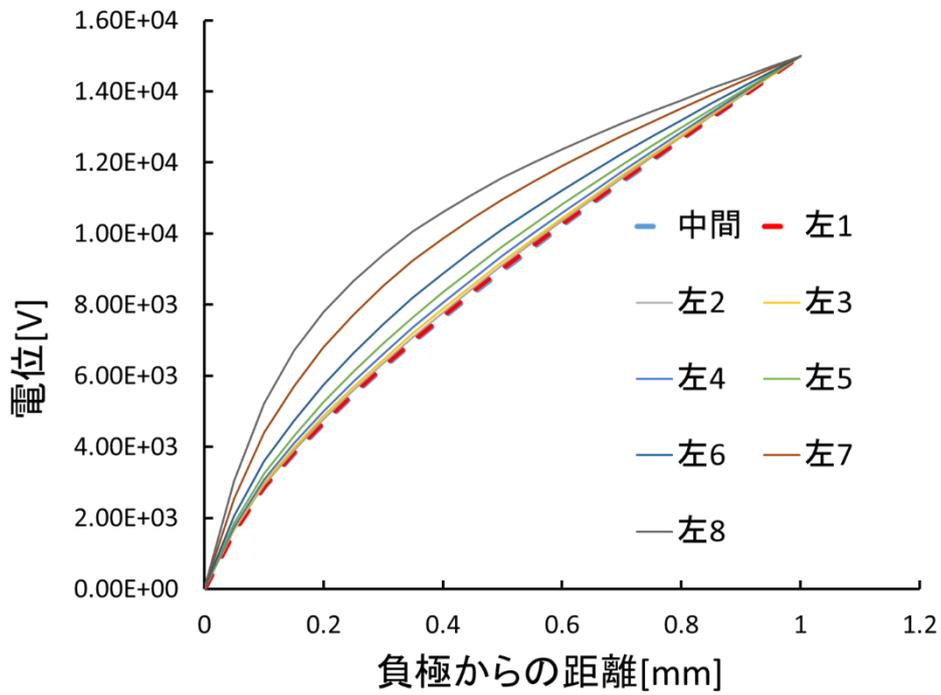


図 3-22 各電極構造における中央部での電位分布のばらつき

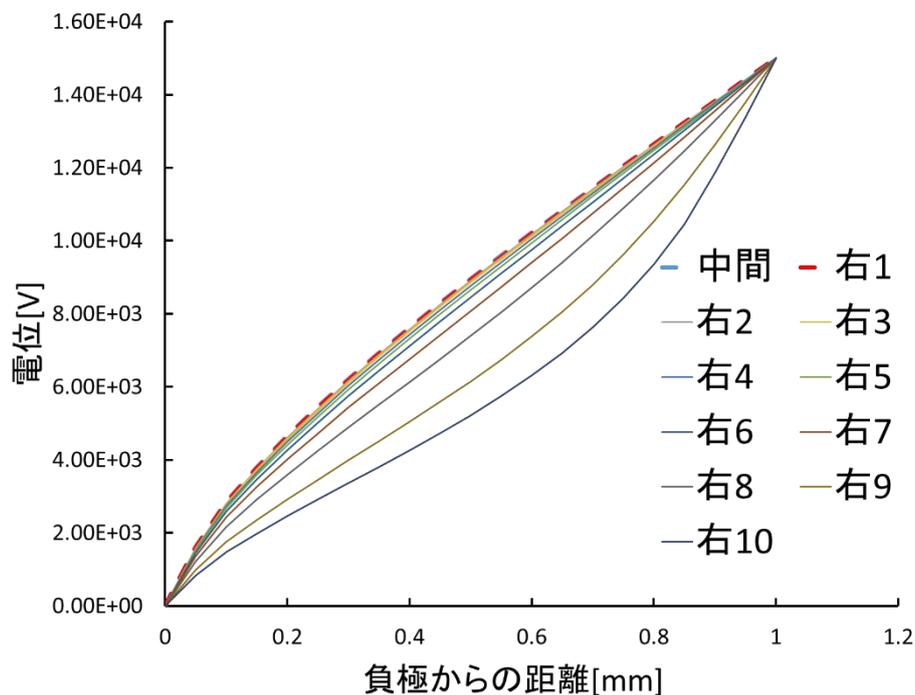


(a) 中央部より右側における電位分布のばらつき

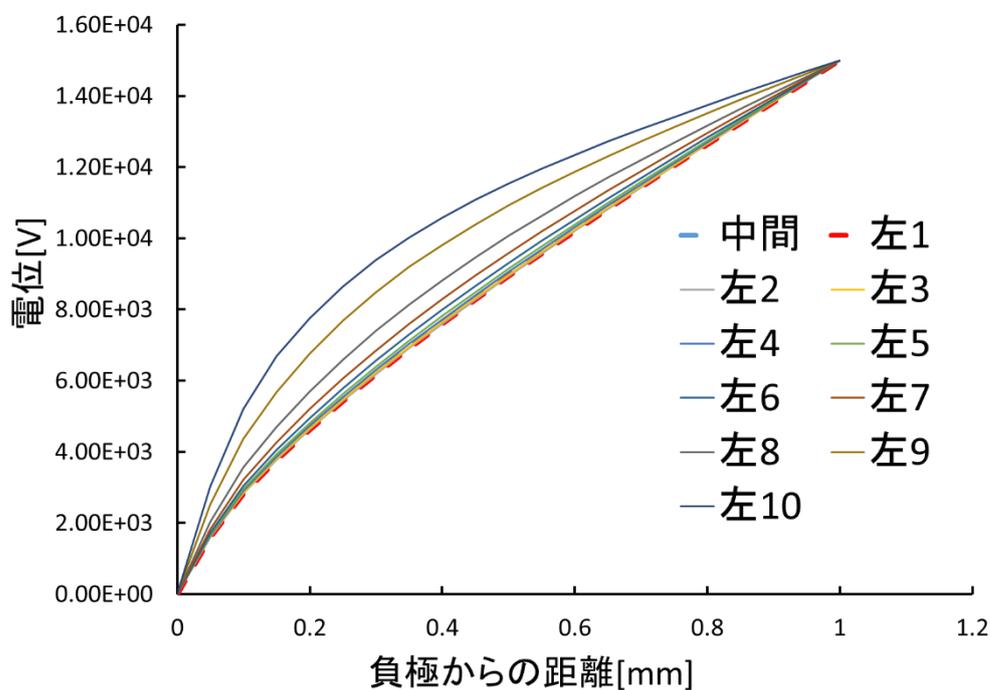


(b) 中央部より左側における電位分布のばらつき

図 3-23 電極幅 4[mm]での電位分布のばらつき



(a) 中央部より右側における電位分布のばらつき



(b) 中央部より左側における電位分布のばらつき

図 3-24 電極幅 6 [mm] での電位分布のばらつき

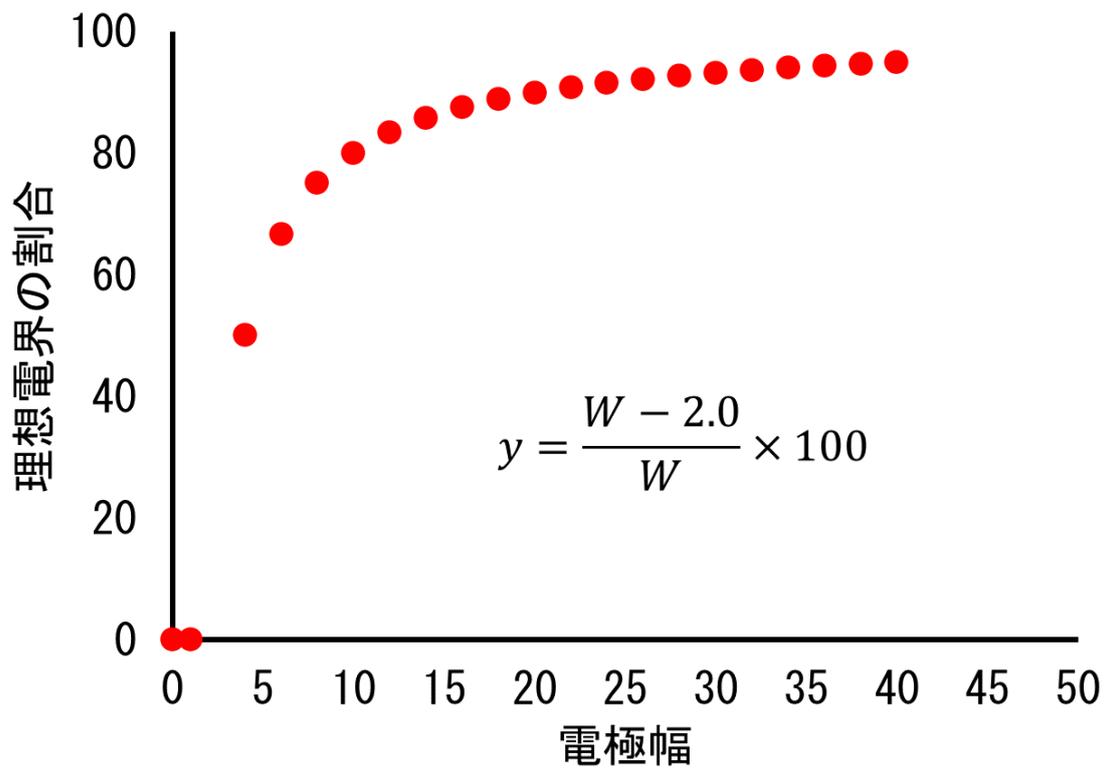


図 3-25 電極幅に対する理想電界の割合

## 第4章 新たな流体駆動源の開発

第3章では、これまで検討が行われてこなかった EHD ポンプの高流量化に着目し、断面積を増やすことによる2種類の流量増加手法を提案した。そして電界解析によって EHD ポンプの配線部による電界が与える影響と、電極幅の関係を明らかにし、高流量化をする上での電極幅の基準寸法を示した。

よって本章では2種類の新たな電極構造の流体駆動源を製作し、性能評価および比較を行うこととした。

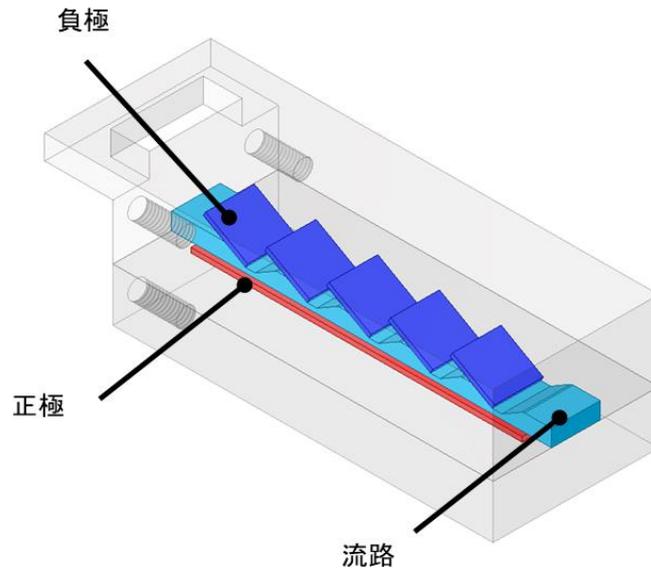
### 4.1 高流量 EHD ポンプの開発

新たな流体駆動源として2種類の提案手法に基づいた EHD ポンプを開発・性能比較を行うために、第3章で基準と定めた幅 10[mm]の EHD ポンプを設計し、この EHD ポンプを基本形状として幅を 20[mm], 40[mm]と拡幅した EHD ポンプと2並列, 4並列と並列化した EHD ポンプをそれぞれ製作し、性能評価と比較を行った。性能評価項目は印加電圧に対する吐出圧力および吐出流量とし、それぞれの電極形状による性能差を比較するために、流路形状や配線などの設計条件をできる限り統一した。

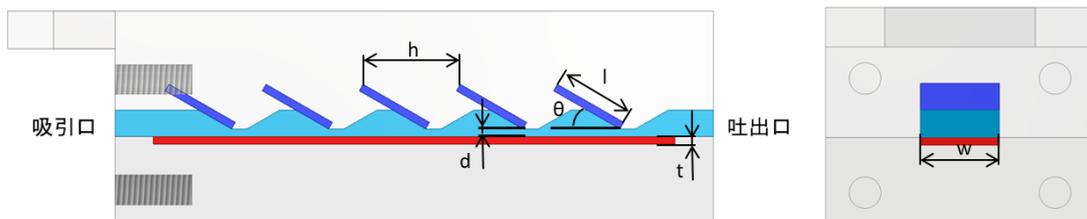
#### 4.1.1 製作した基準 EHD ポンプ

考案した基準 EHD ポンプの構造を図 4-1 に電極構造に関わる各部の寸法をまとめたものを表 4-1 に示す。ポンプ下部に正極側の平板電極を配置し、流路を挟んだ反対側に  $\theta$  [deg]に傾斜させた負極側の平板電極を電極間隔  $d$ [mm]で配置した電極構造であり、負極の直列段数は  $h$ [mm]間隔の5段直列とした。また、電極構造による吐出性能を比較するために配線から発生する電界による影響はなるべく排除する必要があると考え、図 4-2 に示すようにそれぞれ電極の流路と逆側に配線を施した。この EHD ポンプに電圧を印加すると流体は左側の吸引口から入り、吐出口から圧送される。ポンプの吸引・吐出口は縦 3.5[mm], 横は電極幅  $w$  と等しい 10[mm]の長方形とし、流

路形状による吐出性能への影響を排除するためにチューブ等の配管には繋がらない構造とした(図 4-3). この構造により電極幅 $w$ を広げることによって拡幅型のEHDポンプへと応用することができ, 複数の基準ポンプを並列につなげることで並列型のEHDポンプへと応用することが可能となる. 実際に製作した基準EHDポンプを図 4-4 に示す.



(a) 基準 EHD ポンプの外観



(b) 三面図

図 4-1 基準 EHD ポンプの構造

表 4-1 製作する EHD ポンプの各部の寸法

電極厚さ $t$	[mm]	1
電極間隔 $d$	[mm]	1
電極幅 $w$	[mm]	10
負極長さ $l$	[mm]	10
負極間隔 $h$	[mm]	12.5
電極角度 $\theta$	[deg]	30

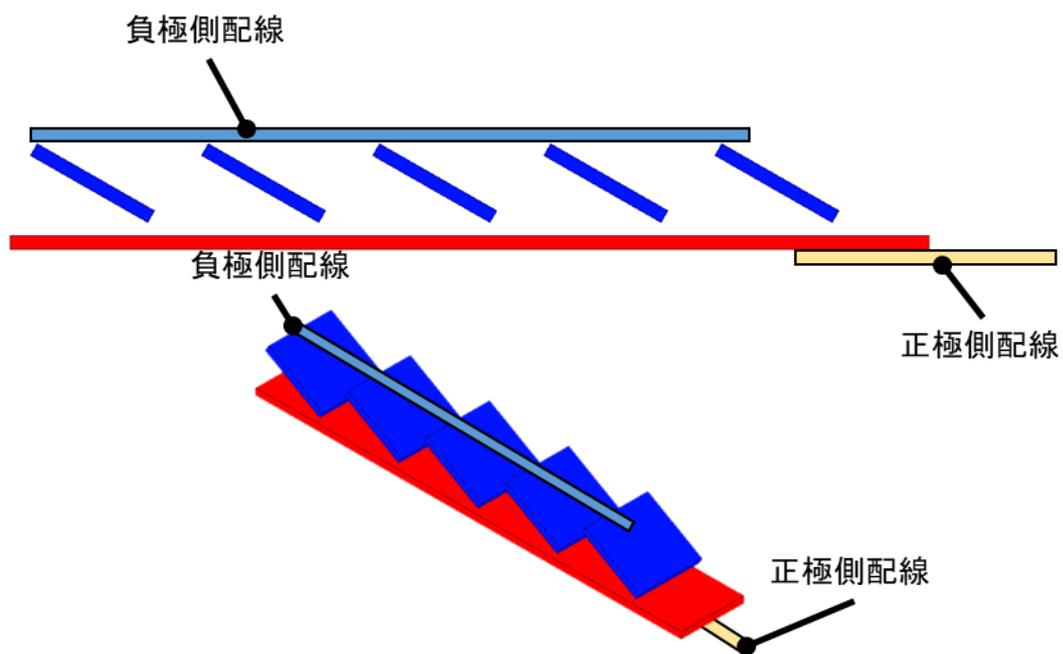


図 4-2 配線位置

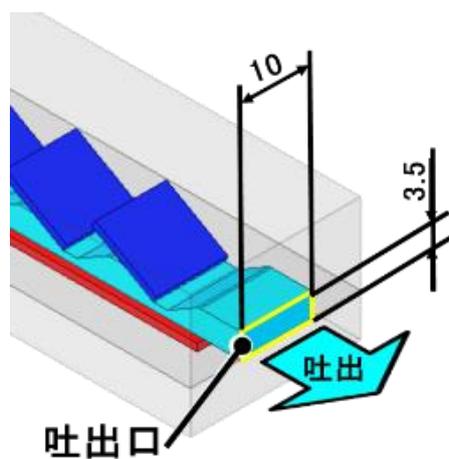


図 4-3 吸入口・吐出口の形状

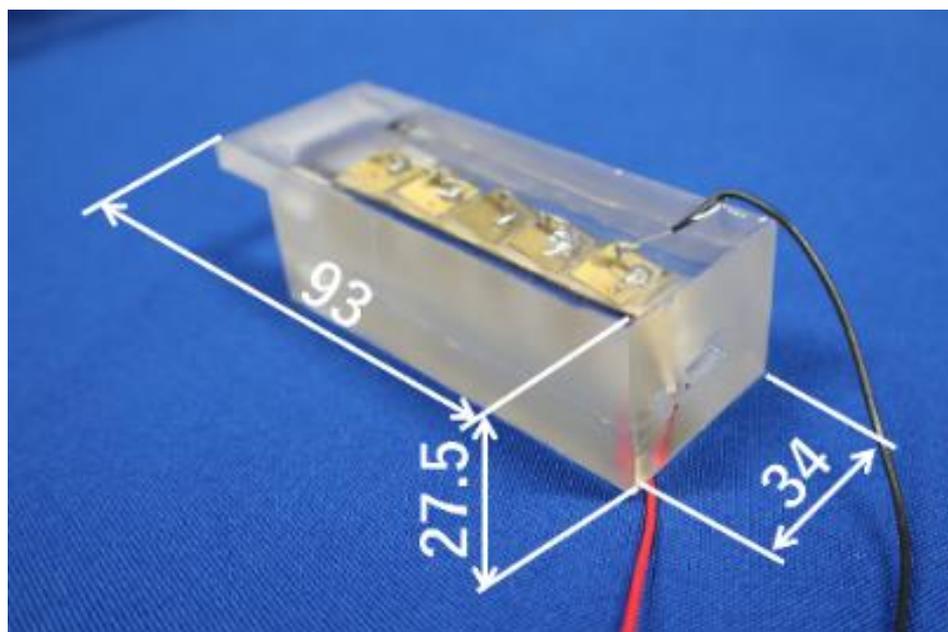
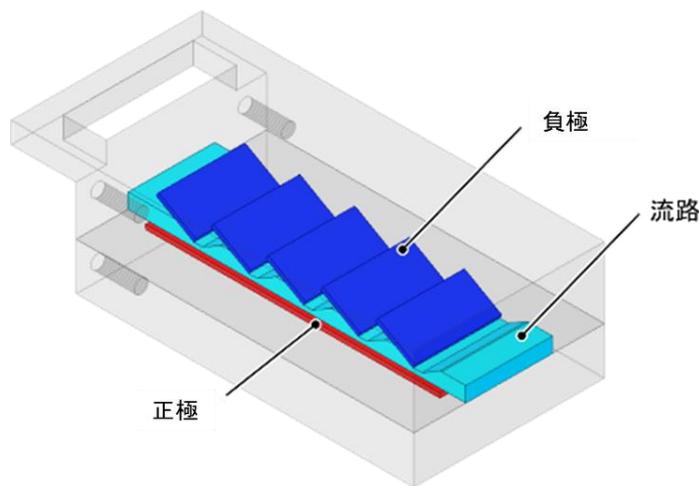


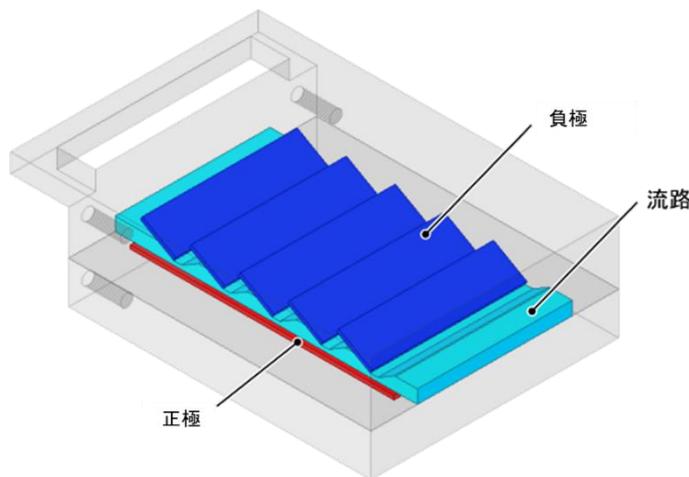
図 4-4 製作した基準 EHD ポンプ

## 4.1.2 拡幅型高流量 EHD ポンプの構造

図 4-5 に拡幅型 EHD ポンプの構造を、図 4-6 に製作した拡幅型 EHD ポンプを示す。基準 EHD ポンプの構造に基づき、電極幅 $w$ を 20[mm], 40[mm]に拡幅した構造であり、それぞれ(a)が 20[mm], (b)が 40[mm]の図である。また、電極段数は同様に 5 段とし、性能評価を行う際流路形状の影響を排除するために吸引・吐出口の形状はチューブ等には接続しない構造とした(図 4-7)。

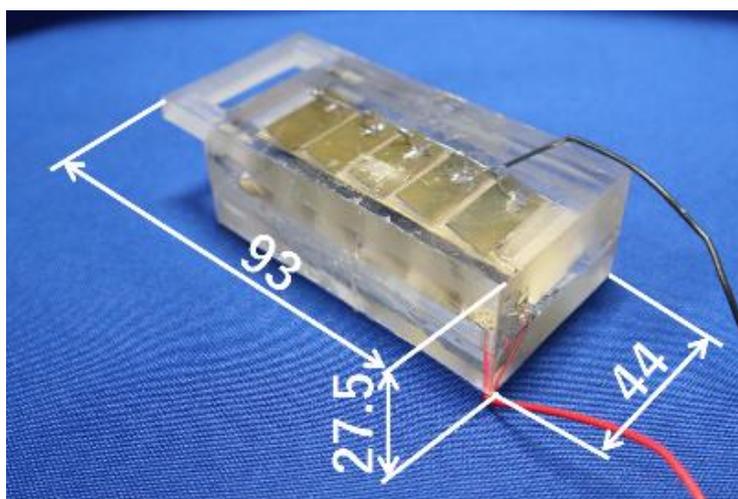


(a) 電極幅 20[mm]

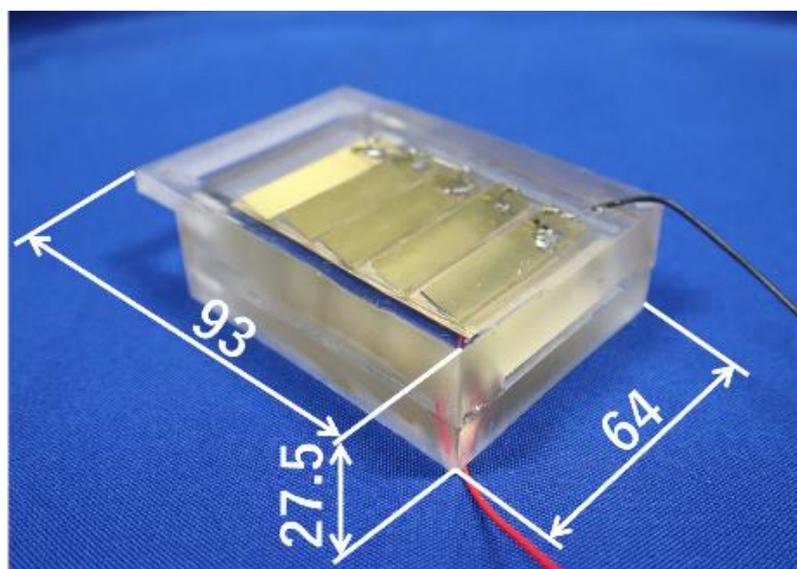


(b) 電極幅 40[mm]

図 4-5 拡幅型 EHD ポンプの構造



(a) 電極幅 20[mm]



(b) 電極幅 40[mm]

図 4-6 製作した拡幅型 EHD ポンプ

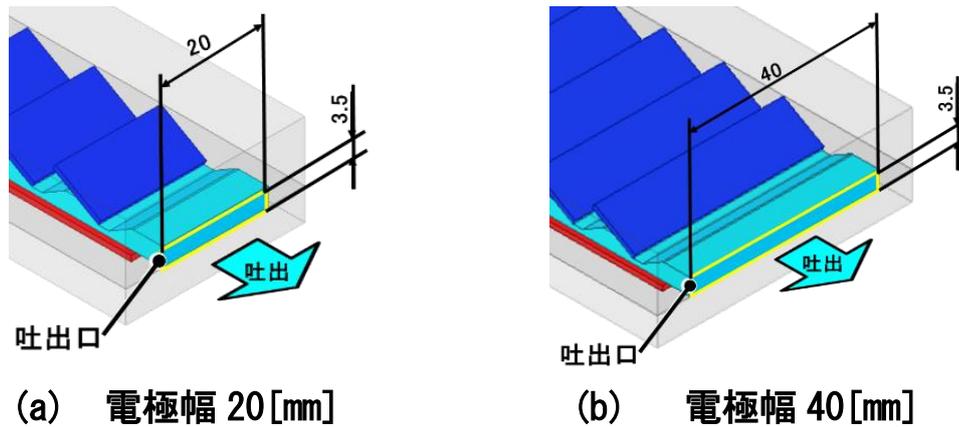
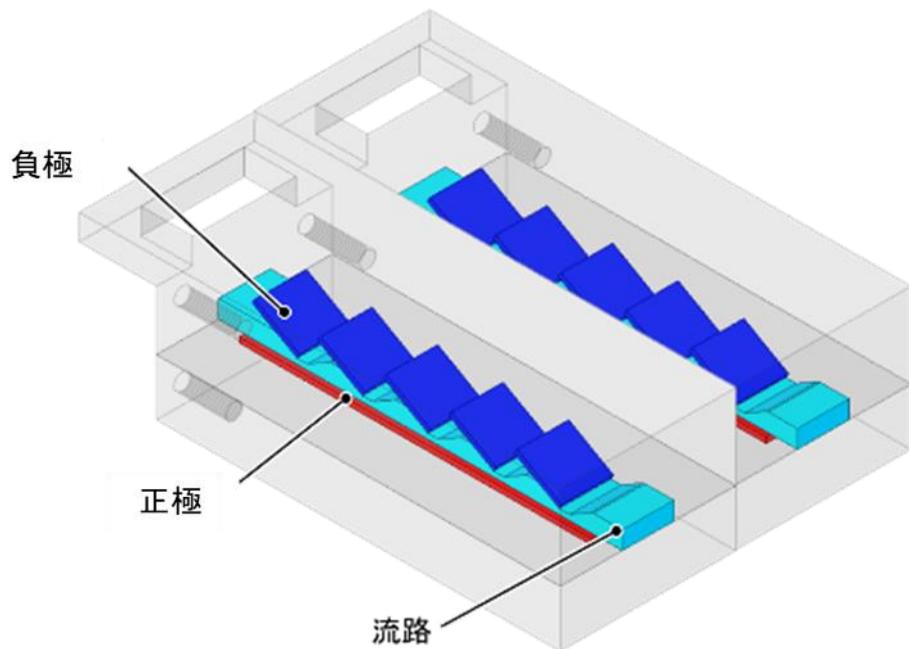


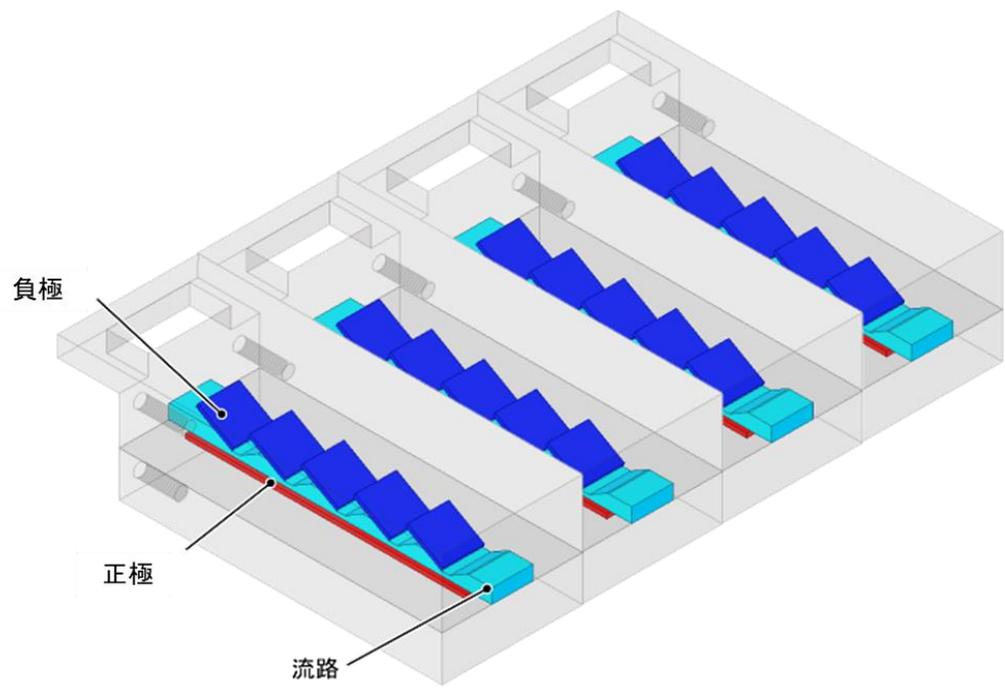
図 4-7 吸入・吐出口の構造

#### 4. 1. 3 並列型高流量 EHD ポンプの構造

図 4-8 に並列型 EHD ポンプの構造を, 図 4-9 に製作した並列型 EHD ポンプを示す. 基準 EHD ポンプを 2 列, 4 列, に並列接続した構造とし, それぞれ(a)が 2 列, (b)が 4 列の図である. また, 電極段数は同様に 5 段とし, 基準 EHD ポンプ, 拡幅型 EHD ポンプと同様に流路形状の影響を排除するために吸引・吐出口の形状はチューブ等には接続しない構造とした.

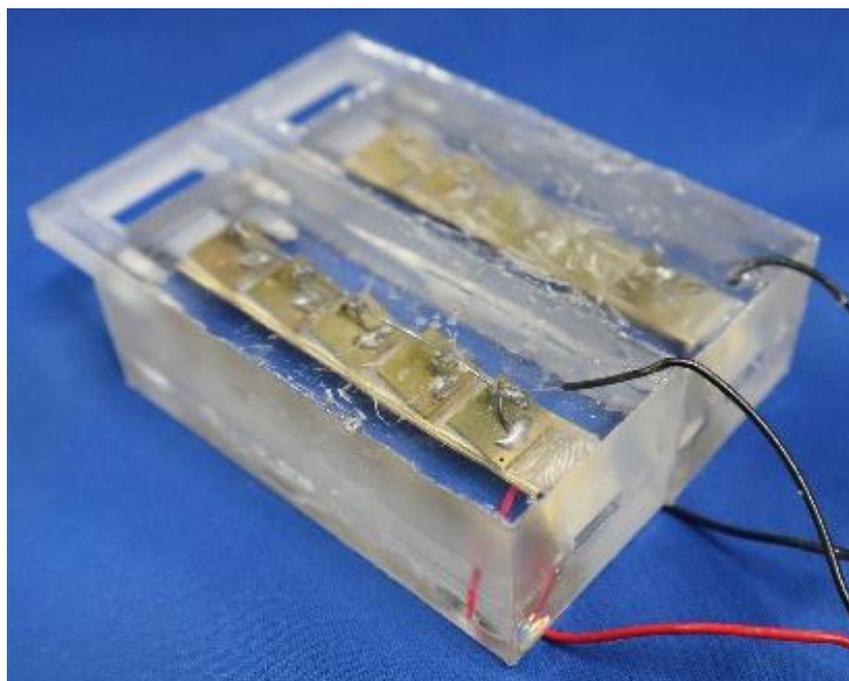


(a) 2 並列

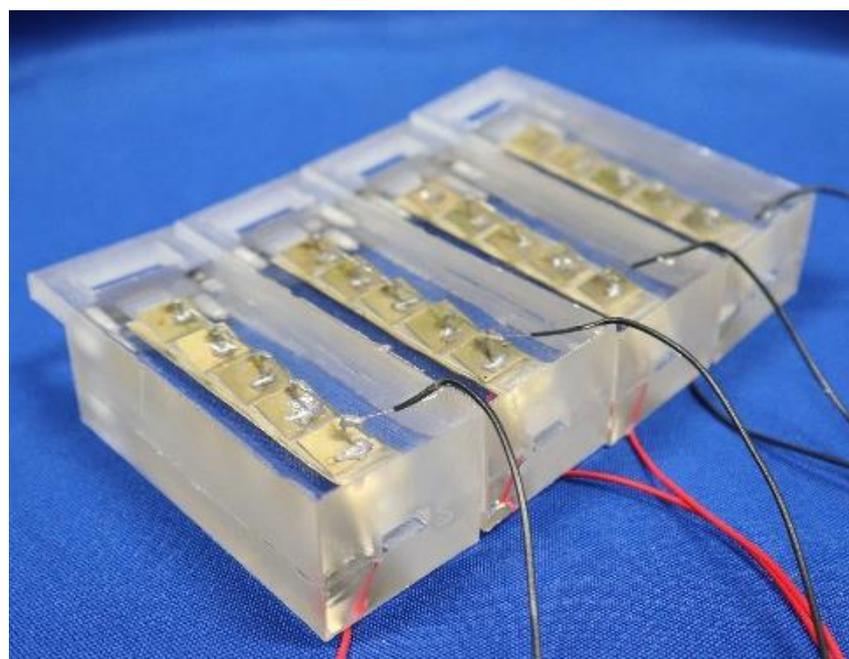


(b) 4 並列

図 4-8 並列型 EHD ポンプの構造



(a) 2 並列



(b) 4 並列

図 4-9 製作した並列型 EHD ポンプ

## 4.2 開発した高流量型 EHD ポンプの性能評価

基準 EHD ポンプを基に 2 種類の高流量型 EHD ポンプを製作したため、性能測定として吐出圧力、吐出流量の測定を行うこととした。

まず、吐出圧力の測定装置は図 4-10 に示すように直流電源(松定プレシジョン製, PLE-36-2.2)と昇圧器(松定プレシジョン製, HP-15P(A)), EHD ポンプ, 流体の入った容器, 管, 直尺で構成した。測定方法は EHD ポンプに 0-10[kV]まで 1[kV]間隔で電圧を印加し, 各印加電圧における管内の液面上層量を直尺で測定, 圧力の算出を行った。なお測定は電圧ごとに 3 回行い平均値を算出した。また, 圧力の算出式は圧力を  $P$ [Pa], 流体の密度を  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>], 重力加速度を  $g$ [m/s<sup>2</sup>], 液面差を  $\Delta h$ [m]とすると,

$$P = \rho g \Delta h \quad (4.1)$$

となる。

次に、吐出流量の測定装置を図 4-11 に示すように直流電源(松定プレシジョン製 PLE-36-2.2)と昇圧器(松定プレシジョン製 HP-15P(A)), EHD ポンプ, 流体の入った容器, 袋, 蓋, はかりで構成した。測定方法は EHD ポンプに電圧印加から 10 秒間袋に液体を吐出した後蓋を閉め, 吐出した液体の質量を計測, 流量の算出を行った。なお測定は電圧ごとに 3 回行い平均値を算出した。また, 流量を  $Q$ [L/s], 流体の密度を  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>], 流体の質量を  $m$ [g], 圧送時間を  $t$ [s], とすると,

$$Q = \frac{m \times 10^{-9}}{\rho t} \quad (4.2)$$

となる。

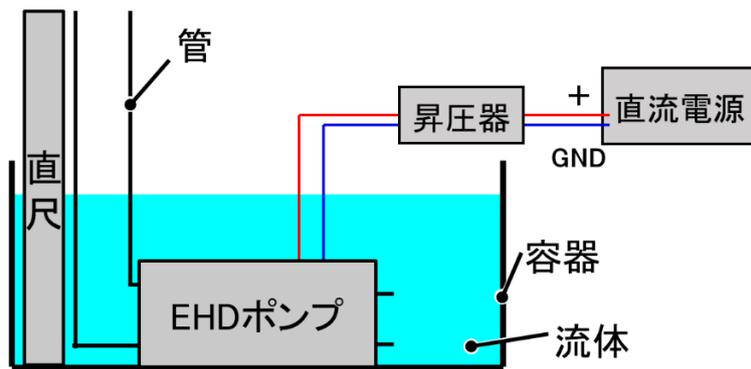


図 4-10 圧力の測定装置

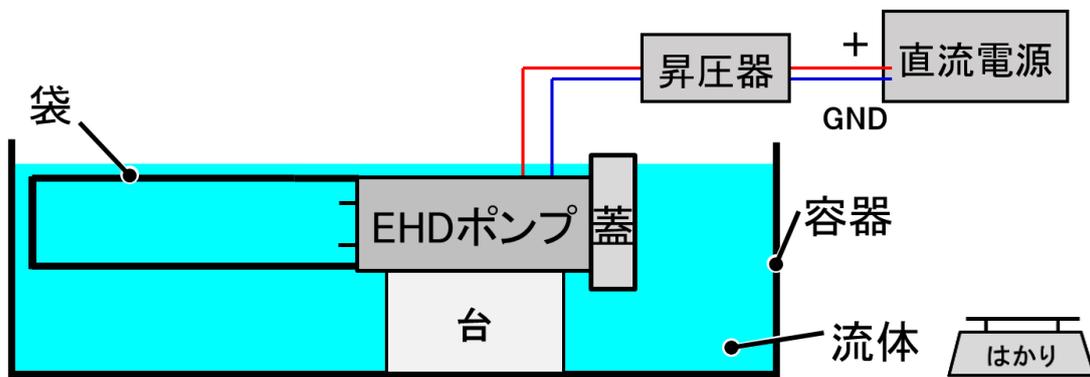


図 4-11 流量の測定装置

## 4.2.1 圧力性能測定結果

拡幅型高流量 EHD ポンプの印加電圧に対する圧力特性を図 4-12 に、並列型高流量 EHD ポンプの印加電圧に対する圧力特性を図 4-13 に示す。各印加電圧における吐出圧力の平均値をプロットし標準偏差と近似式を表している。それぞれのグラフの近似式からもわかる通り圧力は 2 次曲線状に増加しており、電極幅の拡幅と並列化のどちらにおいても、電極の幅の増加による吐出圧力への影響は無いことが分かる。

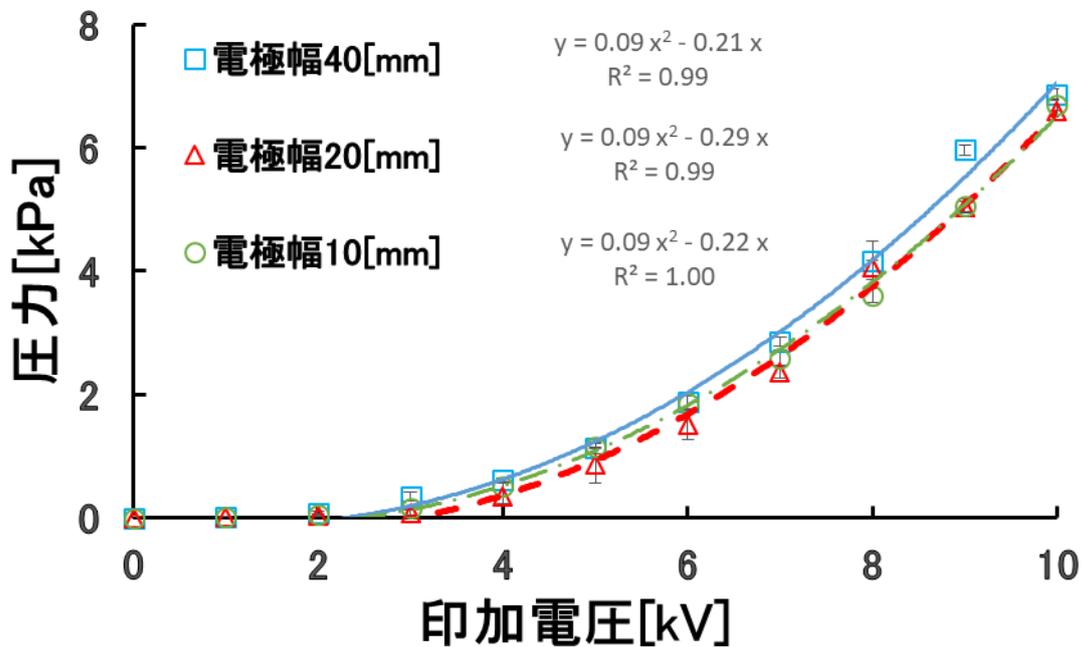


図 4-12 拡幅型高流量 EHD ポンプの圧力特性

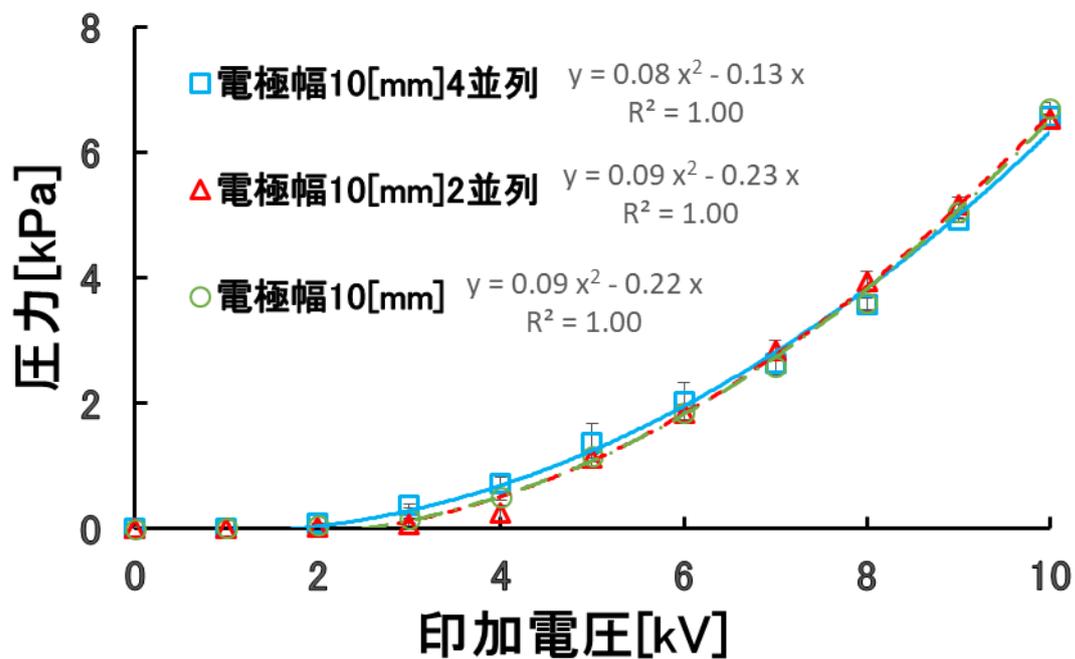


図 4-13 並列型高流量 EHD ポンプの圧力特性

#### 4.2.2 流量性能測定結果

拡幅型高流量 EHD ポンプの印加電圧に対する流量特性を図 4-14 に、並列型高流量 EHD ポンプの印加電圧に対する流量特性を図 4-15 に示す。各印加電圧における吐出流量の平均値をプロットし標準偏差と近似式を表している。それぞれのグラフの近似式からもわかる通り流量は線形に上昇しており、拡幅型・並列型共にポンプの電極幅が広がるほど流量が増加していることが確認できる。

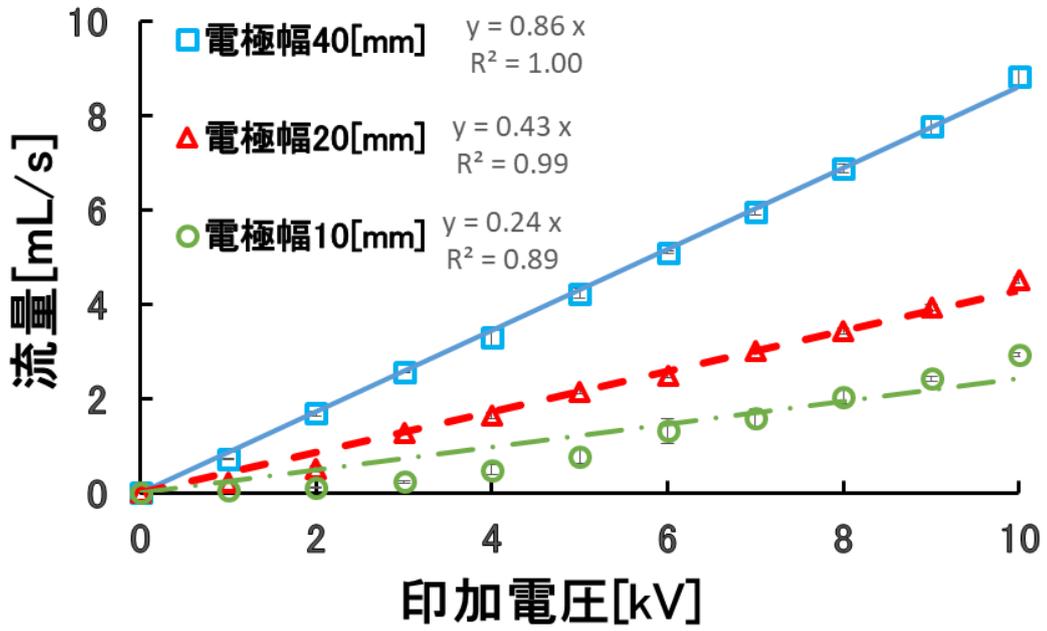


図 4-14 拡幅型高流量 EHD ポンプの流量特性

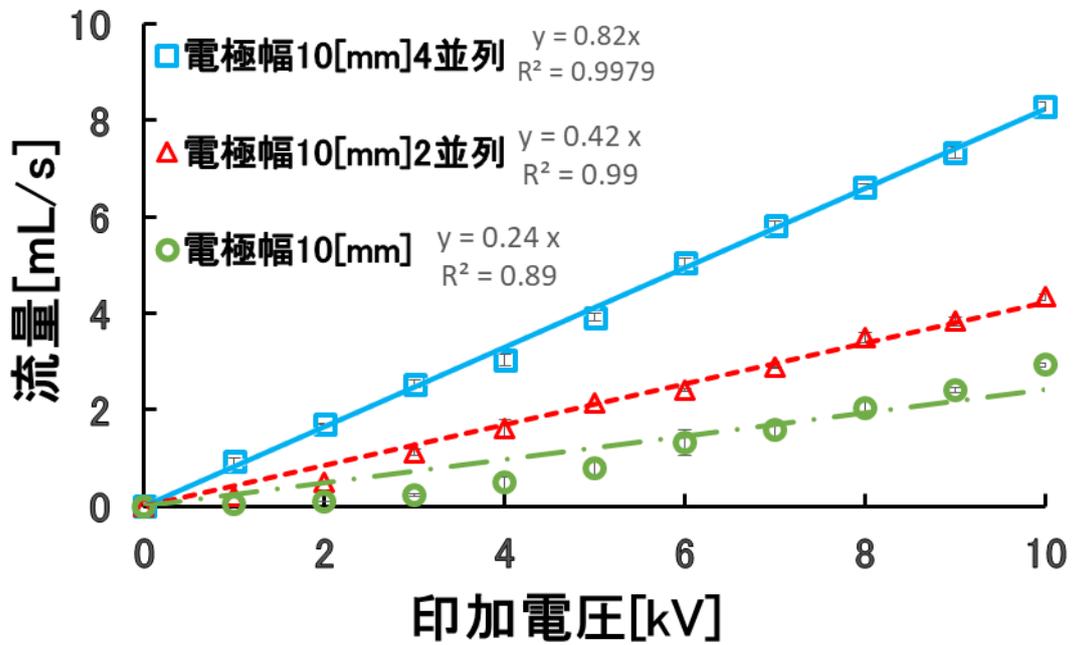


図 4-15 並列型高流量 EHD ポンプの流量特性

### 4.2.3 比較および考察

測定結果より製作した2種類の高流量型 EHD ポンプにおいて、圧力については拡幅した電極幅および並列数に関わらず、すべての EHD ポンプにおいて印加電圧の増加に応じて吐出性能が2次曲線状に向上し、10[kV]印加時に約6[kPa]の吐出圧力を発揮した。つまり EHD ポンプの吐出圧力に関して流路の形状と配線による影響を除いた場合、負極側の電極の直列数と印加電圧が支配的であることを示している。

次に流量については、圧力と同様に印加電圧に応じて吐出性能が向上し、電極幅および並列数が増えることによっても増加する傾向を得た。よって2種類の提案手法はどちらも EHD ポンプの高流量化が可能であることが分かった。ここで、それぞれの手法の流量増加割合を見るために近似式の傾きに注目すると、グラフの近似式から2つの提案手法の流量増加傾向はほとんど変わらず電極幅に応じて線形に上昇していることから、配線および流路形状を考慮することでどちらの手法も同様に扱えることが確認できた。最大標準偏差は40[mm]拡幅化の際に約0.2であった。ここで電極幅による流量の増加倍率に着目し、各 EHD ポンプの近似式の傾きと基準 EHD ポンプとの比較をまとめたものを表4-2に示す。表から基準 EHD ポンプに対して電極幅20[mm]では約1.8倍、40[mm]では約3.6倍に増加し、2並列で約1.8倍、4並列で約3.4倍に増加しており僅かに拡幅型の倍率が高いもののほぼ同程度であることが確認できる。

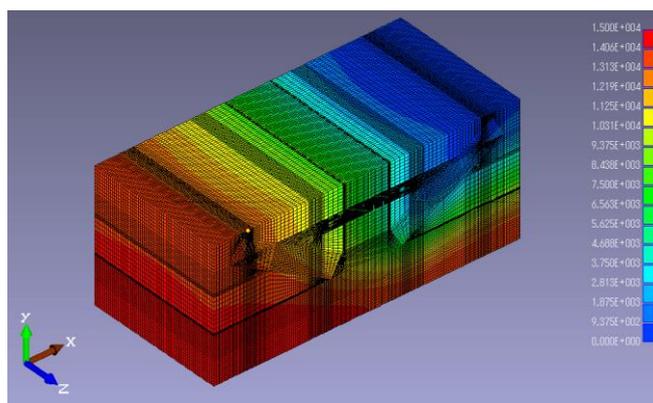
また、EHD ポンプの体積当たりの流量に着目すると、電極幅が40[mm]の時に並列型では〇〇[mL/m<sup>3</sup>]であるのに対し、拡幅型では〇〇[mL/m<sup>3</sup>]である。よって体積当たりの流量効率では拡幅型の構造が優れているといえる。ただし、拡幅型の EHD ポンプでは電極自体が長くなるのに対して、並列型ではポンプを並べることで流量の増加を狙うことが可能なため、一概に並列型が劣っているとは言えない。

**表 4-2 近似線の傾きと基準 EHD ポンプの傾きに対する倍率**

電極幅[mm]	近似線の傾き	基準に対する倍率
10(基準)	0.24	
20(拡幅型)	0.43	1.79 倍
40 拡幅型)	0.86	3.58 倍
10×2(並列型)	0.42	1.75 倍
10×4(並列型)	0.82	3.42 倍

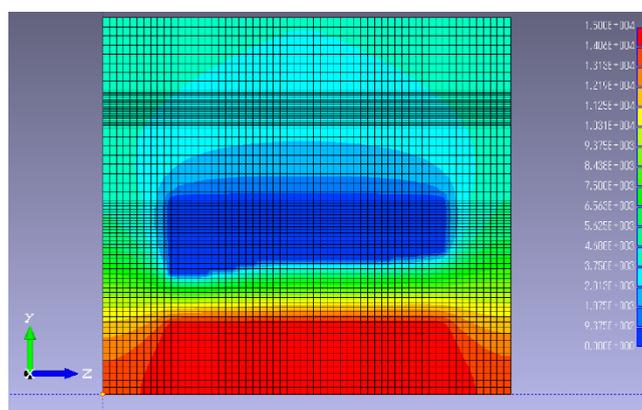
ここで、理論上は流量が 2 倍、4 倍となるべきところが届いていない理由としては、EHD ポンプを手加工で製作していることによる誤差、特に正負の電極の傾きが影響していると考えられる。第 3 章で示した電界解析の結果は全て向かい合う正負の電極が平行になっていることが前提条件であるため、制作した EHD ポンプの電極が傾いていた場合性能が低下することが考えられる。これを確認するために 3.2.1 章と同様の解析条件で負極側の電極が傾いている状態での電界解析を行った。その際傾きは X 軸方向から見たときに左側が 2mm 下がるものとし、液体に触れる側の電極の形状を変更した。解析結果を図 4-16 に示す。図 4-16(b)(c)から分かるように負極側の電極が傾いている場合画像左側の電界強度は強く、右側の電界強度は弱くなり流動の強さにばらつきが生じる。そのため、圧力測定のような流動の発生が少ない実験では影響が少なく、流量測定において影響が強く表れたと考えることができる。

以上のことから、開発した新たな流体駆動源である 2 種類の高流量 EHD ポンプは EHD 現象を応用した高流量駆動源として高流量化に成功しており、設計条件に応じて電極構造などを使い分けることで広い範囲に対応することが可能なこれまでにない流体駆動源であると言える。



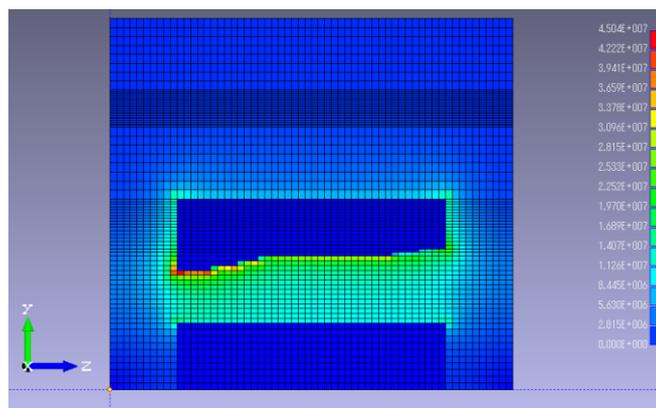
(a) 電界解析結果

(b)



(c) 電界解析結果(電位分布)

(d)



(c) 電界解析結果(電界強度)

図 4-16 拡幅型高流量 EHD ポンプの流量特性

## 第 5 章 新たな流体駆動源のロボット駆動機構への応用

第 4 章では開発した新たな流体駆動源の応用として、中・大型の装置へ応用を行うこととした。

第 1 章で述べた通りこれまでの EHD ポンプは流量に関してほとんど検証が行われず、優れた制御性や静穏性、柔軟性をもちながらもそれを中・大型の装置へ生かすことができなかった。これに対して、開発した新たな流体駆動源である高流量 EHD ポンプを応用することでこれまでの問題点を解決した液圧駆動のアクチュエータを開発することが可能となると考え、アクチュエータの開発および試験的なロボット駆動機構への応用を行うこととした。

### 5.1 高流量 EHD ポンプに適したアクチュエータの開発

開発した新たな流体駆動源である高流量 EHD ポンプは電気エネルギーを直接流体運動に変換するため、流体の圧送機構に機械的駆動部が存在しないことから過負荷に対して流体が自由に逆流することが可能であるため、高いコンプライアンス性を有している。よって、ソフトロボティクスの分野へ応用することとした。このソフトロボティクスに関連する研究として、福祉機器や小型ロボットへの応用を目指した空気圧などの流体を駆動源としたアクチュエータの研究・開発が行われており<sup>4)</sup>、この流体駆動型アクチュエータの中でも代表的なものとして、生体筋肉のように柔軟な動作が可能且つ軽量のソフトアクチュエータとして人工筋(McKibben 型人工筋)がある。

McKibben 型人工筋は空気圧などの流体を駆動源としており、発生力/重量比が 240 とアクチュエータの中でも高く、柔軟性があり、人間の筋特性と同様の特性を持つことが挙げられる<sup>5)</sup>。更に、水中で使用可能など、耐環境製に優れており、材料費も安価で入手のし易さも利点として考えられる。これらの特徴から、則次らは、空気圧ゴム

人工筋を用いた立ち上り動作支援や人体装着型(ウェアラブル)のパワーアシスト装置<sup>40) 41)</sup>, 手の動作を支援する機能回復用のパワーアシストグローブを開発している<sup>42), 43)</sup>. また小林らは, 介護者や肉体労働者の腰から上半身の力作業を補助する装置である外骨格構造の「マッスルスーツ」やスーツのように装着するパワーアシスト機器も開発している<sup>44)</sup>. その他にも辻内らは開発したゴム人工筋を使った義手<sup>45)</sup>, 川嶋らは開発した人工筋を動力源とした遠隔操縦のマニピュレータを開発する<sup>46)</sup>など, 様々な分野への応用が行われている. McKibben 型人工筋は, 図 5-1 に示すように高弾性の膨張体(ゴムチューブ)にメッシュ状のスリーブを覆うように配置し, 両側をジョイント部品で固定した構造で, 膨張体内に圧縮流体を注入すると, スリーブの作用により, 膨張体が短軸方向に大きく膨張し, 人工筋全体が長手方向に収縮する. また, 圧縮流体の注入を停止することで膨張体の弾性力により膨張体内部の流体を排出し, 膨張体および人工筋全体が弛緩する仕組みである. そのため, 駆動時に弾性力を超える高圧力が必要であることや, スリーブの繊維角度など幾何学的な要素が多いため, 収縮力と収縮率の計算が容易ではないことから制御が難しいという問題点も抱えている<sup>7)</sup>.

これに対して, EHD ポンプによって駆動する人工筋を新たに開発することで人工筋の問題点を解決することができると考えた. 従来の人工筋は駆動源であるコンプレッサによって流体の抽出しができないことから高弾性の膨張体によって内部の流体を抽出す駆動方式となっており駆動圧力は数百 kPa から数 MPa である<sup>7)</sup>. 一方, EHD ポンプは外部機器無しで流体の抽出しが可能となるため, 人工筋の構造から高弾性の膨張体を排除することが可能となり駆動圧力を低下させることが可能となると考えた.

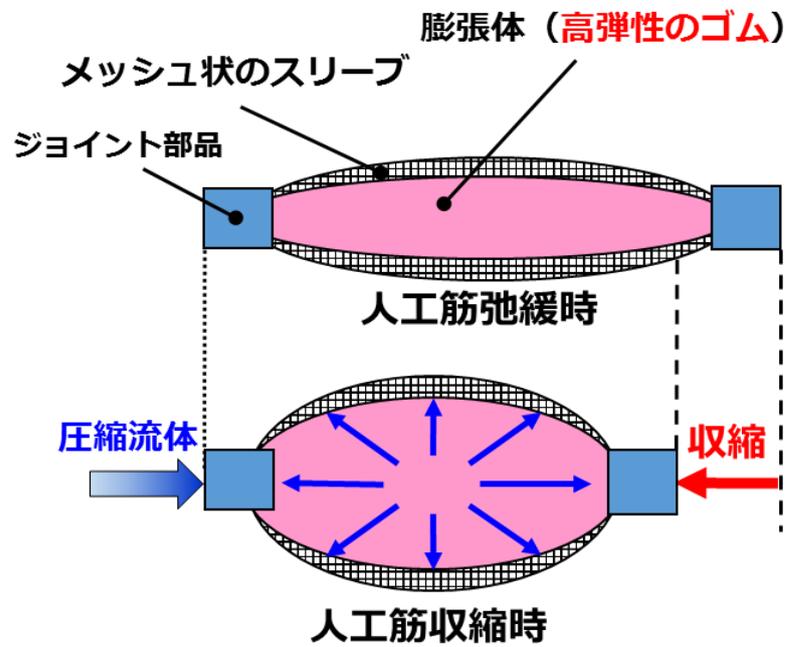


図 5-1 McKibben 型人工筋の構造

### 5.1.1 EHD 人工筋の構造

5章1節で述べたように従来の McKibben 型人工筋は膨張体を覆っているスリーブの繊維角度など幾何学的な要素の影響が多いため、収縮率によって発揮される収縮力が変わるため、収縮率や収縮力の計算が複雑になる。さらに、人工筋の収縮時、つまりは流体の圧送時に膨張体の弾性力が抵抗となるため数百 kPa から数 MPa の印加圧力が必要であるという問題があった。そこで、本章では従来の McKibben 型人工筋とは異なる構造の新たな人工筋を開発することで、これらの問題を解決することとした。

考案した人工筋の構造を図 5-2 に示す。この人工筋はY方向に変位が可能な蛇腹型の膨張体を人工筋の膨張体として用いることとした。蛇腹形状の膨張体については谷口からも空気圧柔軟アクチュエータと呼び開発を行っているが、谷口らは膨張体の身長方向への伸びやすさから変位角の向上を狙い蛇腹型を採用しているため、設計思想が異なる<sup>47)</sup>。膨張体の上面と下面にボードを貼付け、そのボード間に紐を配置し、図 5-3 のように膨張体の中心に取りつけたリングに紐を通す構造とした。また、蛇腹型の膨張体の上部には EHD ポンプから流体を注入する口を設けた。この構造により注入する流体によって蛇腹型の膨張体がY方向にふくらみ、膨張体からボードにかかる圧力を、紐を介してX方向の収縮力に変換する構造とした。また、蛇腹型の膨張体としたことにより、Y方向にふくらむ際の抵抗が少なくなるため、従来の McKibben 型人工筋と比べ低圧力な数kPa での動作が可能となる。この人工筋は図 5-4 に示すように流体の注入によって蛇腹型の膨張体が縦に膨張し、ボードと紐の作用により、人工筋全体が横方向に収縮する。そして、図 5-5 に示すように流体を吸引し拔出すと膨張体が萎み、人工筋が横方向に弛緩する構造である。この時、膨張体がボードを押すことでリングを介して常に直角に紐を引くことができるため、どの収縮率においても発揮される収縮力は紐の角度の影響を受けなくなる。よって印加圧力に対する収縮力の算出式から収縮率を取り除くことが可能となる。この人工筋を EHD 人工筋と呼ぶこととした。

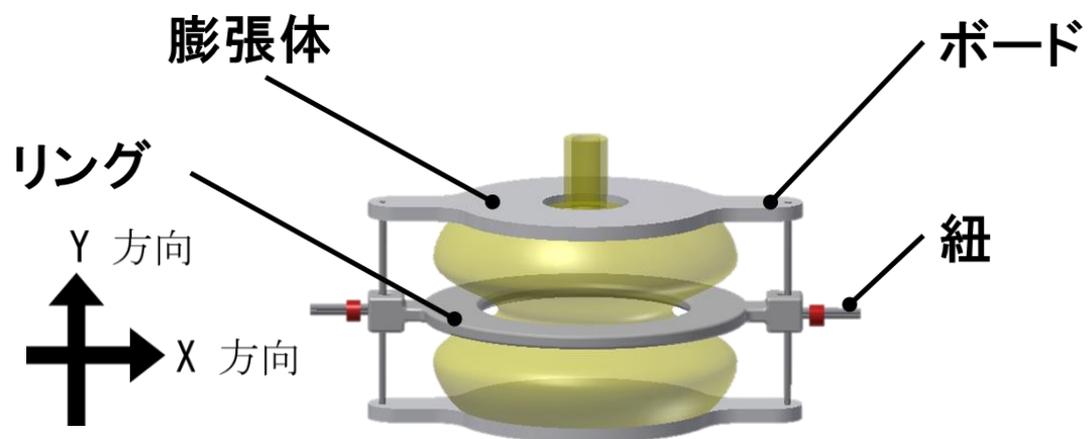


図 5-2 EHD 人工筋の構造

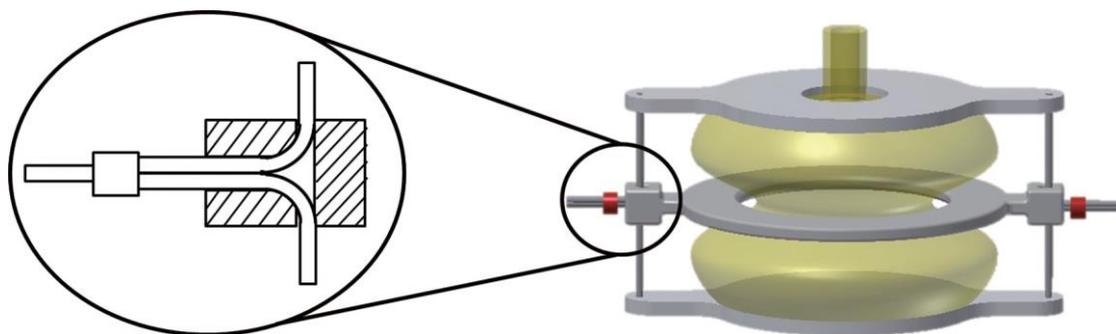


図 5-3 リングの内部構造

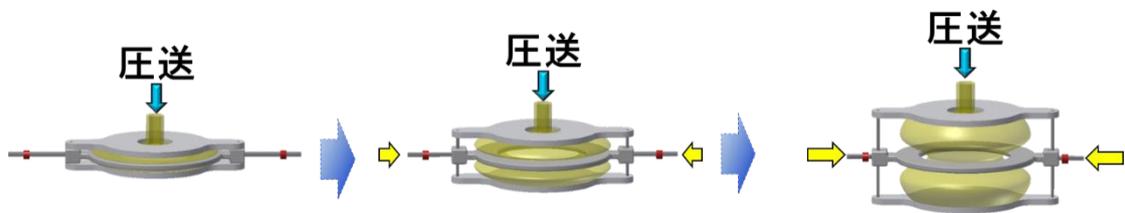


図 5-4 流体の圧送

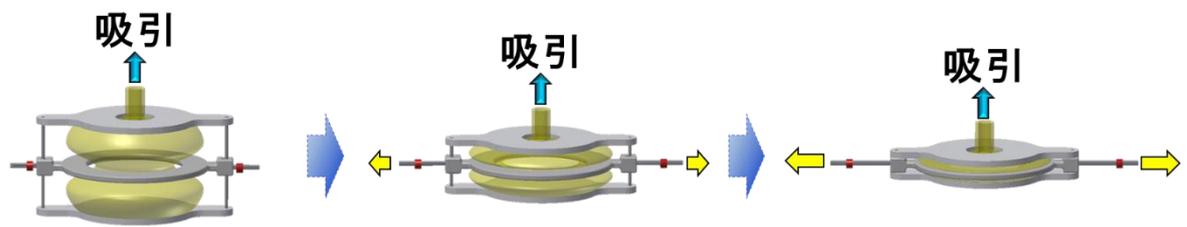


図 5-5 流体の吸引

考案した EHD 人工筋の収縮率に関しては、図 5-6 に示すように蛇腹型の膨張体の最大高さを  $h$ 、リングからボードまでの長さを  $h/2$ 、人工筋の収縮時の長さを  $L_0$ 、人工筋の弛緩時の最大の長さを  $L$  とすると、収縮率  $\varepsilon$  は

$$\varepsilon = (L - L_0) / L_0 \quad (5.1)$$

となり、収縮後と収縮前の長さは

$$L = L_0 + (h/2 + h/2) = L_0 + h \quad (5.2)$$

となる。

以上のことから、この EHD 人工筋を設計する際は膨張時の最大高さを決めることで、容易に収縮率を計算することができる。

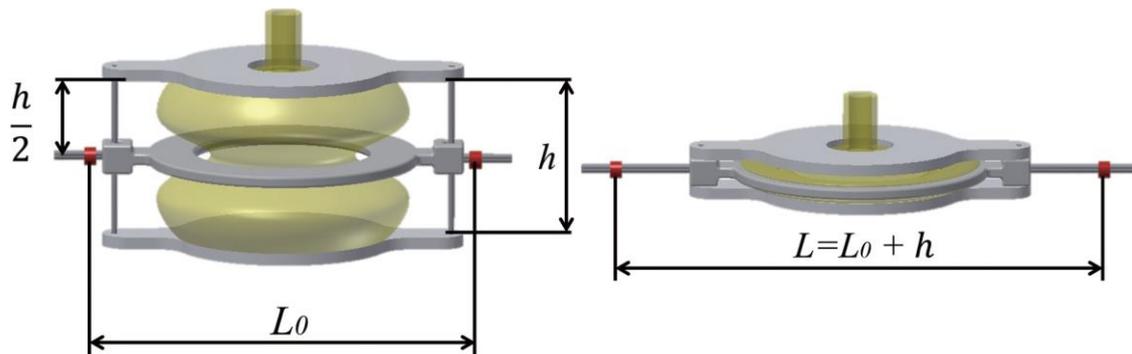


図 5-6 EHD 人工筋の収縮時と弛緩時の構造

## 5.1.2 収縮力の概算方法

従来の McKibben 型人工筋は、膨張体がスリーブを押し広げるように膨張することで収縮するのに対して、考案した EHD 人工筋は収縮時には上面・下面の板にかかる圧力を、紐を介して収縮力に変換するため(図 5-7)、印加圧力と膨張体とボードの接触面積から収縮力を概算できる構造である。

ここで、収縮力の概算方法について説明する。まず、印加圧力を  $P$  [kPa]、膨張体とボードの接触面積を  $A$  [m<sup>2</sup>]、収縮力を  $F$  [N]、ボードと膨張体の接触面の外径を  $D$  [m] とする。このとき、人工筋は最大収縮した状態と仮定すると、収縮力  $F$  は以下の式となる。

$$F = PA \quad (5.3)$$

ここで、人工筋を構成するボードは円形であることから、その面積  $A$  は

$$A = \pi(D/2)^2 \quad (5.4)$$

となり、(5.3)式に(5.4)式を代入すると

$$F = P \cdot \pi(D/2)^2 \quad (5.5)$$

と概算でき、従来の人工筋と比べ収縮力の算出が簡便化できると考えた。

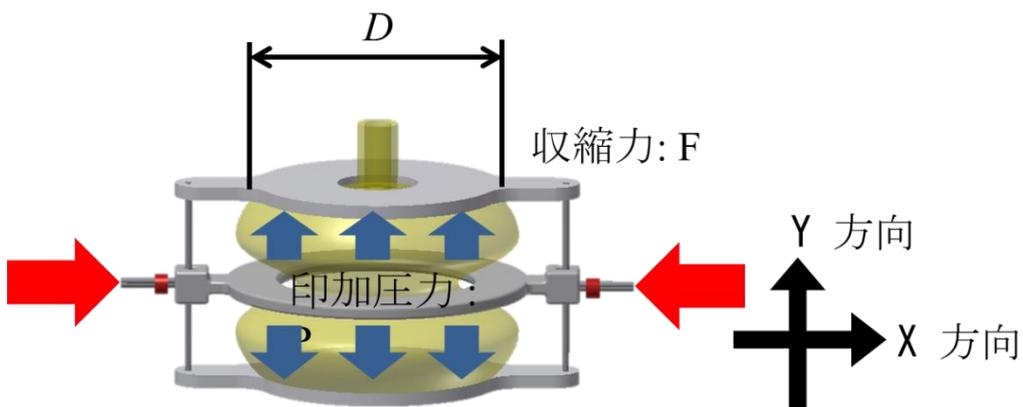


図 5-7 収縮力の発生原理

### 5.1.3 開発した EHD 人工筋

EHD 人工筋の目標性能として、従来の McKibben 型人工筋の収縮率がおおよそ 20～25%であるため、目標収縮率は McKibben 型人工筋を超える 30%となるような設計とした。開発した蛇腹型の膨張体を図 5-8 に、そして、EHD 人工筋を図 5-9 に示す。構造体の寸法は最大径を 45[mm]、最小径を 2[mm]、山の数を2とし、材質は柔軟性に優れた軟質ポリウレタンとした。また、収縮時(膨張体が膨脹時)の人工筋の長さを 67[mm]、高さを 35[mm]、弛緩時(膨張体が収縮時)の人工筋の長さを 95[mm]、高さを9[mm]、ボードと膨張体の接触直径を 36[mm]とし、人工筋全体の質量は 11[g]である、ここで最大印加圧力は 40[kPa]とした。

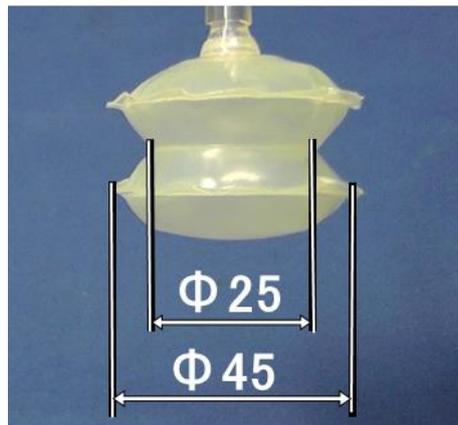


図 5-8 開発した蛇腹型の膨張体

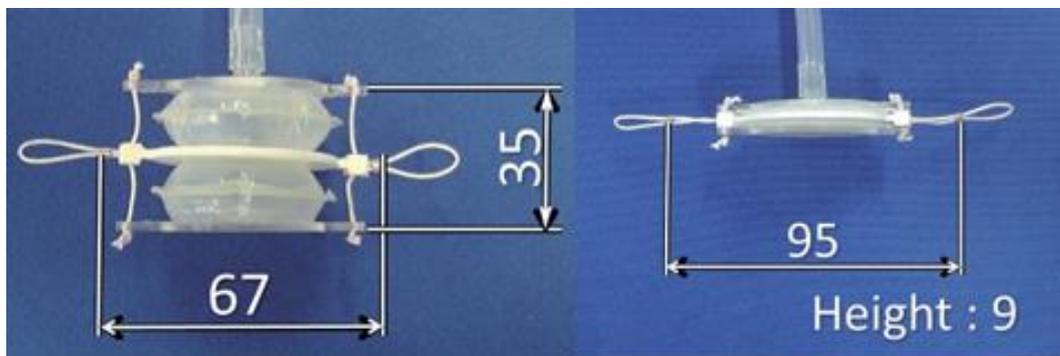


図 5-9 開発した EHD 人工筋

#### 5.1.4 EHD 人工筋の特性評価のための EHD ポンプ

開発した EHD 人工筋の出力特性を評価するために高圧力の吐出が可能な EHD ポンプを製作することとした。人工筋評価用 EHD ポンプの電極構造を図 5-10 に全体の構造を図 5-11 に示す。平行に配置されているのが+電極、その+電極に対して斜めに配置されているのが GND 電極であり、主に人工筋の印加圧力に対する出力特性を評価することを目的としているため単列の電極構造とし、長さ  $L_1 = 5[\text{mm}]$ 、厚さ  $t = 1[\text{mm}]$ 、幅  $h = 7[\text{mm}]$  の GND 電極を、+電極との最短距離  $d = 1[\text{mm}]$  で配列した。なお GND 電極の+電極に対する角度  $\theta$  は  $30[\text{deg}]$  とし、双方向に流れを発生させるために向かい合うように配置した。ここで、EHD ポンプの目標性能は、弾性に依存しない駆動によって低圧力での人工筋の駆動が可能となることと、膨張体自体の耐圧を考慮し  $40[\text{kPa}]$  と設定し、電極を双方向ともに 15 段直列に配置することとし、流路を腸のように折り返す構造とすることで電極構造を密集させている。

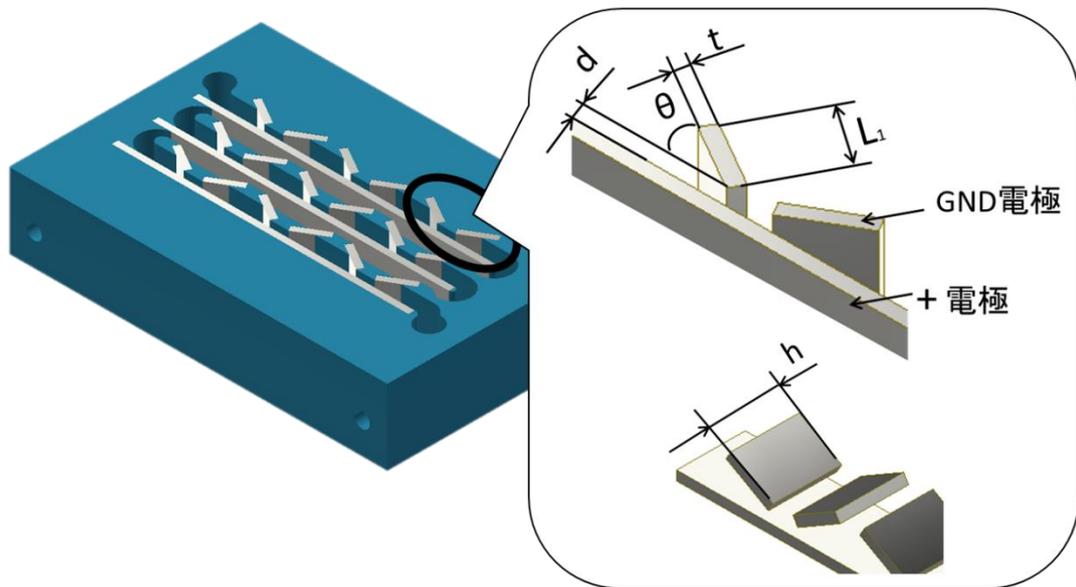


図 5-10 人工筋評価用 EHD ポンプの構造

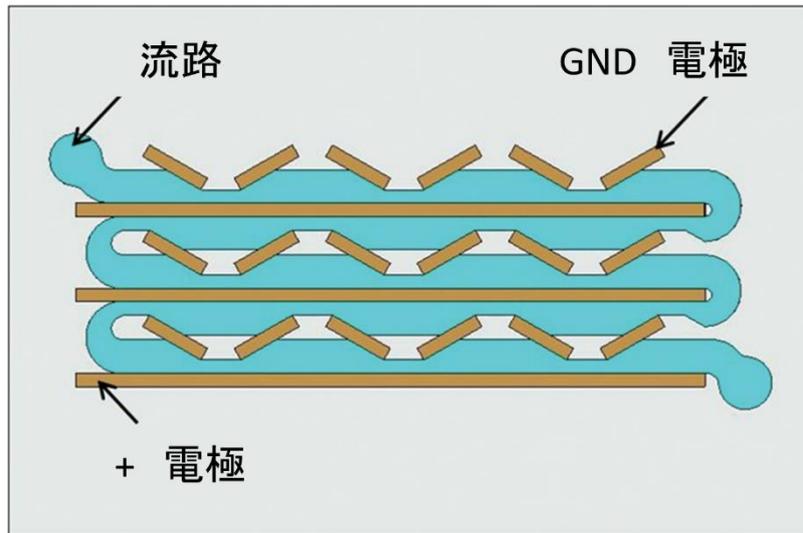


図 5-11 EHD ポンプ全体の構造

製作した人工筋評価用 EHD ポンプを図 5-12 に示す。エポキシ樹脂製の筐体に真鍮製の電極を内蔵し、ポンプの吐出口は上方向(方向 1)と下方向(方向 2)に設けた構造とした。この EHD ポンプ圧力特性を図 5-13 に示す。丸印実線で示しているのが方向 1、三角形と破線で示しているのが方向 2 の吐出圧力である。グラフから分かるように、この EHD ポンプは印加電圧の上昇に伴い圧力も上昇し、方向 1 と方向 2 どちらの方向でもその特性は同様であった。そして、最大印加電圧である 13[kV]印加時、方向 1 で 47.1[kPa]、方向 2 で 43.3[kPa]の圧力が得られ、設計時の目標圧力 40[kPa]を達成できている。なお、方向 1 と方向 2 において同じ印加電圧に対する吐出圧力の差は、方向 1 を基準とした場合平均 6.9%、最大で 8.2%(13[kPa]印加時)であったが、EHD ポンプは電圧の微調整によって吐出圧力を調整できるため、機器などに組み込む際にはフィードバック制御等でこの差は吸収可能と考えている。

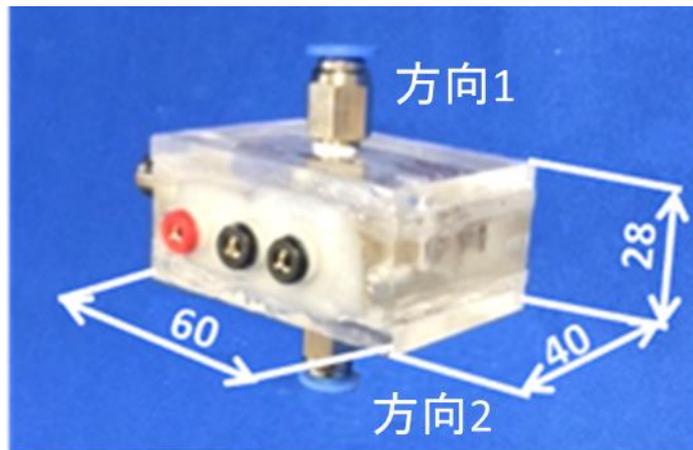


図 5-12 製作した EHD ポンプ

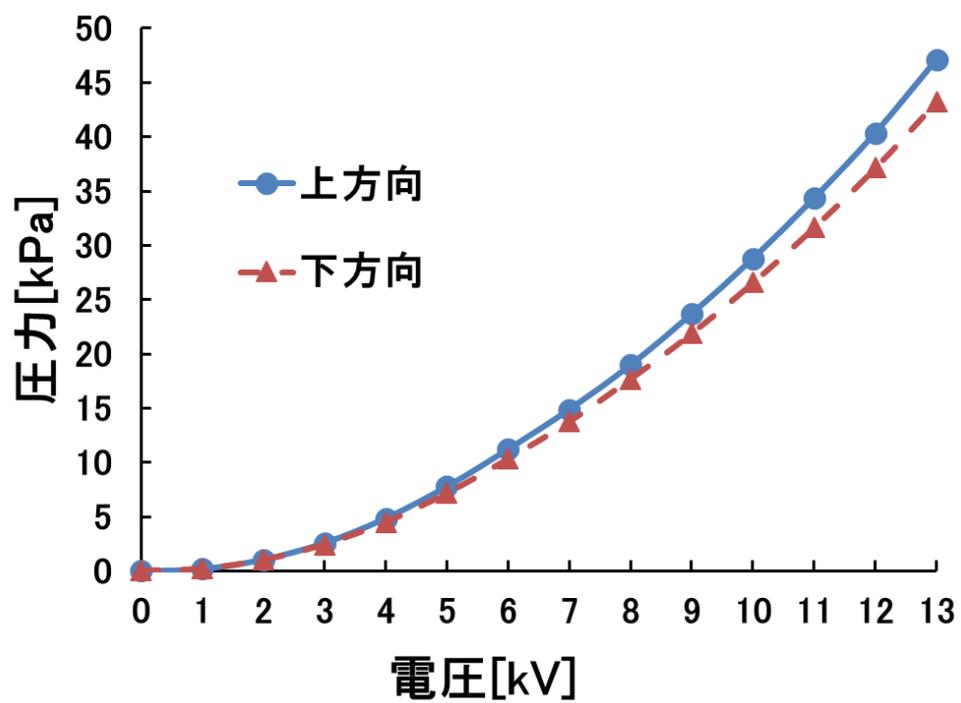


図 5-13 製作した EHD ポンプの圧力吐出性能

### 5.1.5 開発した EHD 人工筋の収縮率特性および収縮力特性

開発した EHD 人工筋の特性を評価するために人工筋評価用 EHD ポンプを用いて EHD 人工筋を駆動し、収縮率特性と収縮力特性の測定を行うこととした。また、EHD 人工筋の収縮率に対する収縮力特性を明らかにするために等尺性収縮特性の測定を行うこととした。

#### (1) 実験方法

収縮率特性の測定装置は図 5-14 に示すように、EHD 人工筋、人工筋評価用 EHD ポンプ、電源(松定プレジジョン製 PL-18-2)、圧力計(SMC 製 ZSE40AF-01-X-M)、リザーバを接続した。EHD 人工筋に最低限の負荷(0.5[N])をかけ続けた状態で最大収縮するまで 5[kPa]間隔で圧力を EHD ポンプから印加し、スケールを用いて EHD 人工筋の長さを測定し、収縮率を算出した。測定回数は 5 回とした。

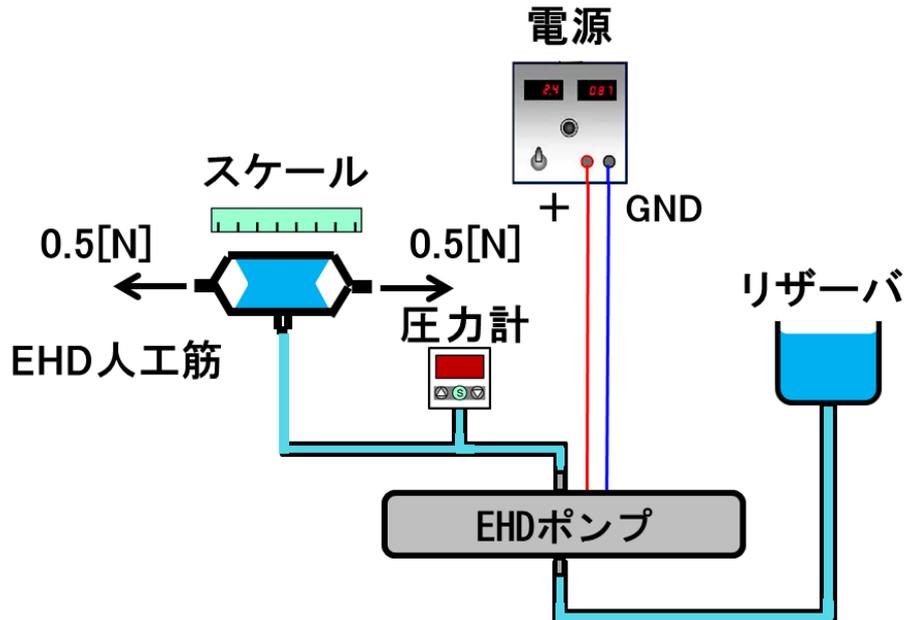


図 5-14 収縮率測定装置

収縮力特性の測定装置は EHD 人工筋，人工筋評価用 EHD ポンプ，電源(松定プレシジョン製 PL-18-2)，圧力計(SMC 製 ZSE40AF-01-X-M)，リザーバを接続し，プッシュプルゲージ(アイコーエンジニアリング製 RX-10)を用いて測定した．なお，EHD 人工筋は完全弛緩した状態として片側を固定し，最大印加圧力を 40kPa になるまで，EHD ポンプから印加する圧力が 5[kPa]間隔となるように EHD ポンプに印加する電圧を調整した．測定回数は 5 回とした．

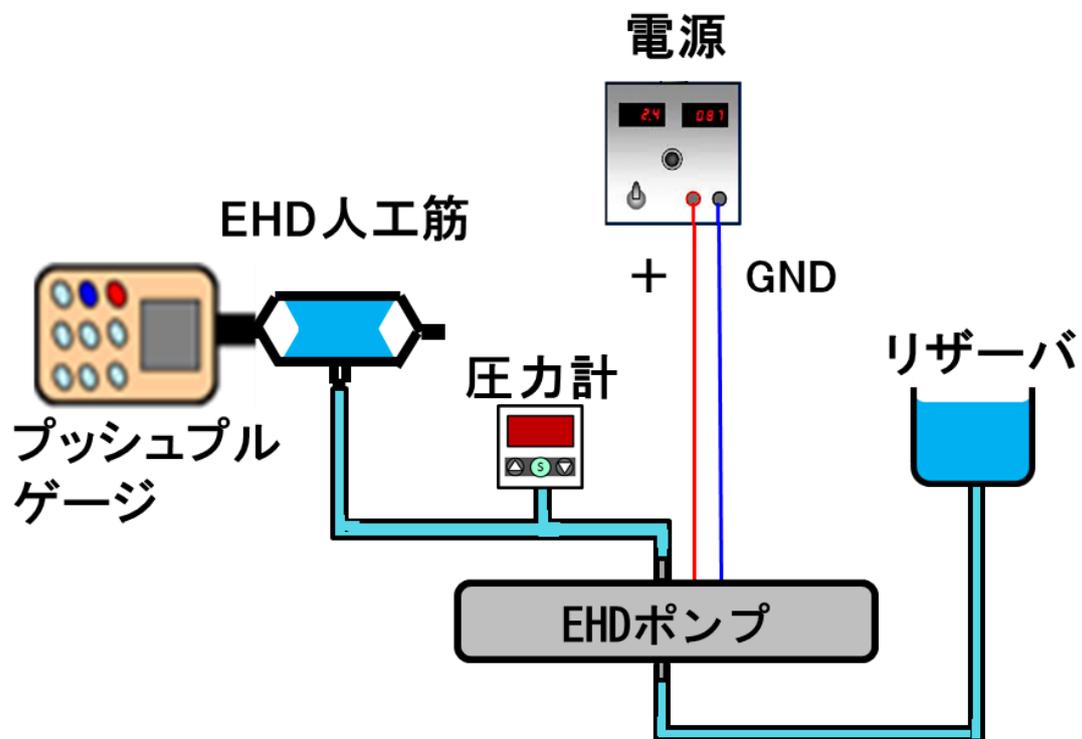


図 5-15 収縮力測定装置

次に、等尺性収縮特性の測定装置は図 5-16 に示すように EHD 人工筋、人工筋評価用 EHD ポンプ、電源(松定プレシジョン製 PL-18-2)、圧力計(SMC 製 ZSE40AF-01-X-M)、リザーバを接続し、リニアステージ、ばねばかり(シンワ製 No.74459)、スケールで構成した。等尺性収縮特性は、収縮速度が発生していない状態で人工筋が発揮する収縮力であるため、一定の圧力を印加した状態の人工筋を任意の収縮率で固定し、リニアステージを取付けたばねばかりで引張り、収縮率が変化した瞬間のばねばかりの値を収縮力として記録した。なお、印加圧力は 20[kPa]、25[kPa]、30[kPa]とし、それぞれの圧力で最大収縮するまで0%から5%毎に収縮率を変化させ測定した。測定回数は5回とした。

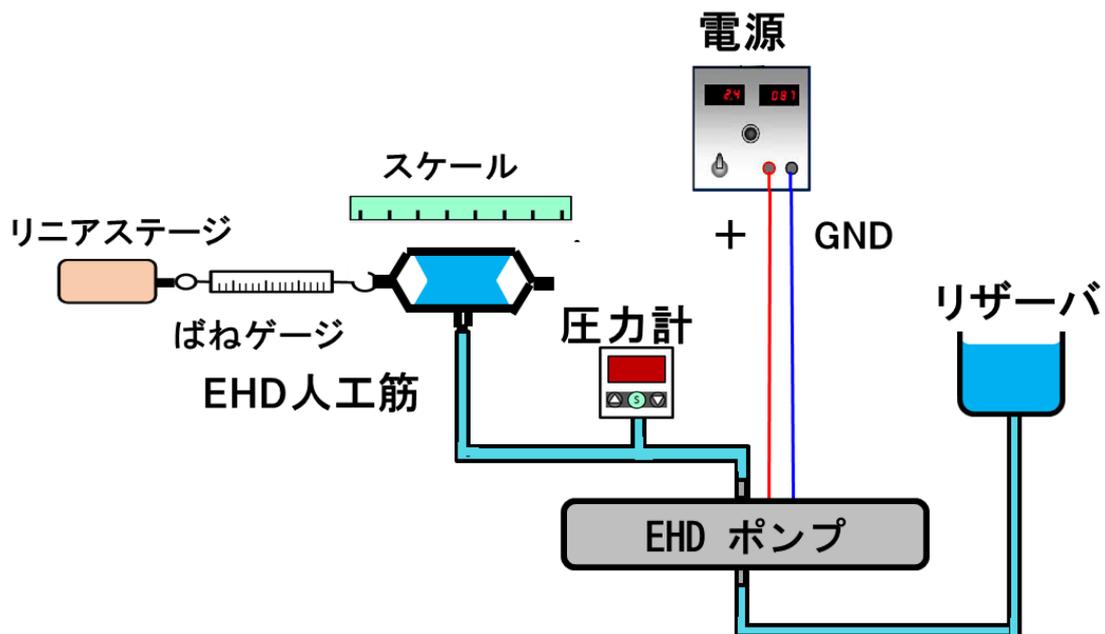


図 5-16 等尺性収縮特性測定装置

## (2) 実験結果および考察

収縮率特性の測定結果を図 5-18 に示す。横軸が印加圧力、縦軸が収縮率であり、赤線が印加圧力の上昇に伴って収縮率の上昇が見られ、印加圧力 25[kPa]付近から圧力を上げて収縮率が上昇しなくなり、30[kPa]で最大収縮率である 29%を示した後は、上昇は見られなかった。これは、蛇腹型の構造体がY方向にふくらみきってしまい、人工筋がそれ以上収縮できなかつたことを示していると考えられる。また、5回の測定における収縮率の差は最大で約1%であった。目標値である 30%には届いていない理由としては、リングと紐が接触していることによる摩擦が原因であると推測できる。

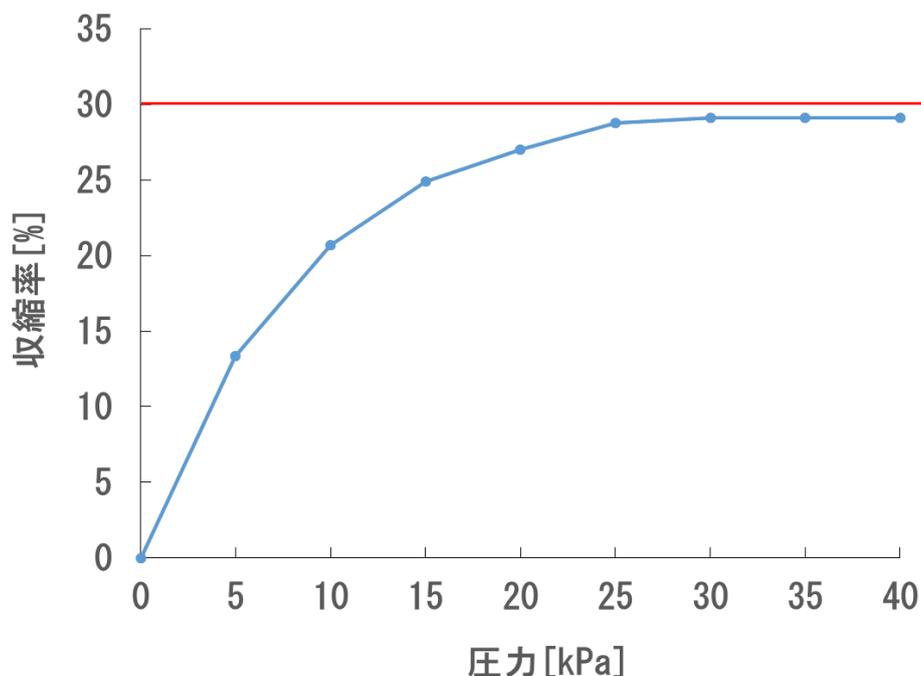


図 5-17 収縮力測定結果

次に、収縮力特性の測定結果を図 5-17 に示す。横軸が印加圧力、縦軸が収縮力であり、グラフの三角形と破線が算出式より算出した理論値、丸印が実測値であり実線で直線近似している。グラフの傾向として、5[kPa]印加時には既に収縮力が発生し、印加圧力に対してほとんど線形に上昇することが確認できた。また、最大印加圧力 40[kPa]には最大収縮力 31[N]が発生し、標準偏差は最大でも約 1[N]であった。ここで、理論値と比較すると発生する収縮力が理論値に届いておらず、近似式から収縮力は想定のおよそ 80%しかないが、これは収縮率同様リングと紐が接触することによる摩擦が原因であると考えられる。

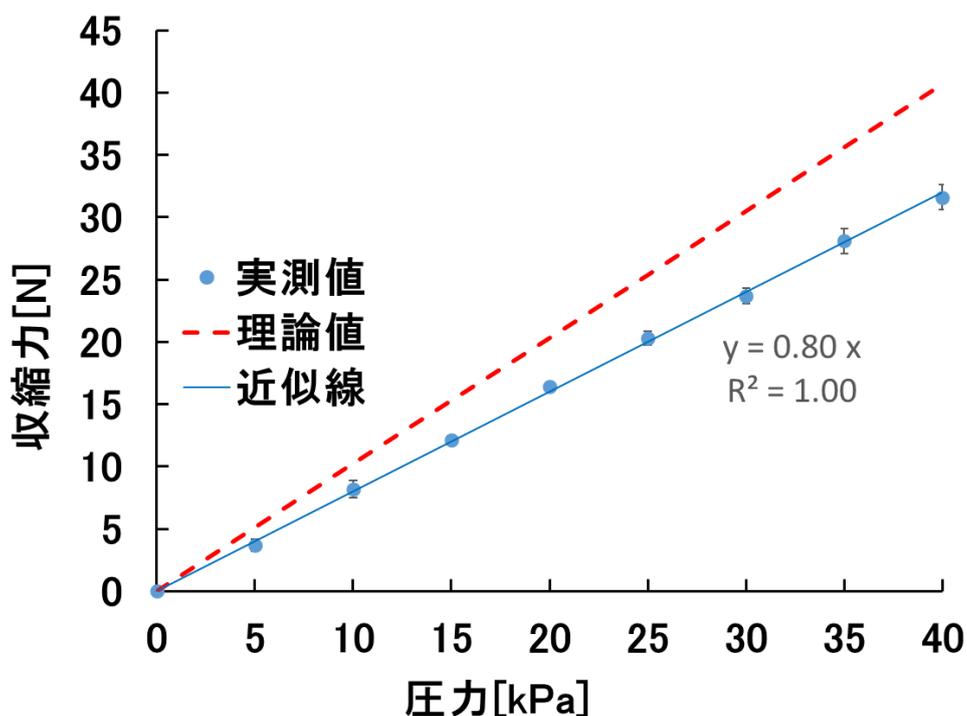


図 5-18 収縮率測定結果

最後に、等尺性収縮特性の測定結果を図 5-19 に示す。横軸が収縮率、縦軸が収縮力であり、各測定結果をプロットしその平均値直線を 30[kPa]では実線、25[kPa]では破線、20[kPa]では二点鎖線で示している。誤差はあるものの、どの収縮率においても印加圧力に対して収縮力はほぼ一定となる傾向を得た。また、各測定における収縮力の差はほとんどなく最大でも約 0.5[N]であった。さらに、図 5-17 と図 5-19 を比較すると、例えば印加圧力 30[kPa]時の収縮力はそれぞれ 24.6[N]と 24.7[N]となっており、同程度の値となっていることがわかる。このことから、どの収縮率においても紐の角度が一定となり、印加圧力に応じた収縮力の発生ができると考えられる。以上の結果より、EHD 人工筋は、収縮率に関係なく印加圧力に応じた収縮力を発揮する特性を持つと言える。そしてこれは、位置や力を制御する場合、McKibben 型人工筋よりも制御が容易となり、また、用途に合わせた設計が容易であると考えられる。

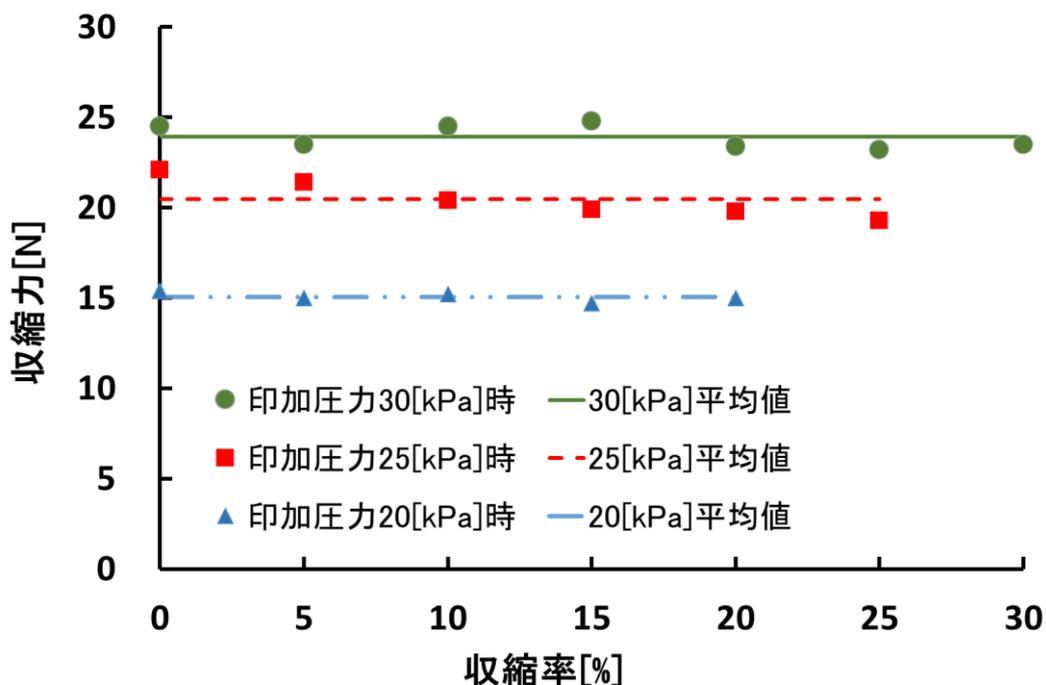


図 5-19 等尺性収縮特性測定結果

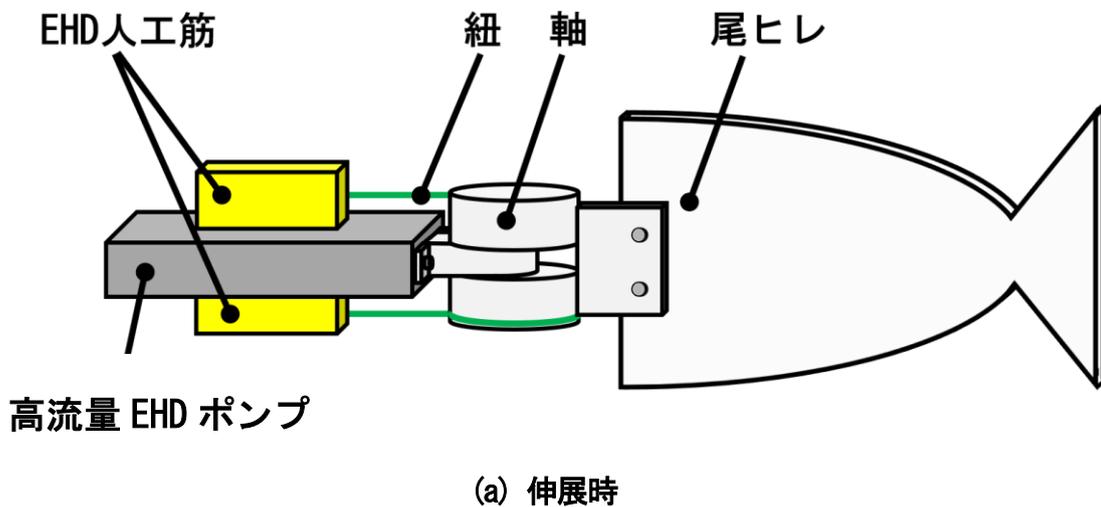
測定結果より, EHD 人工筋は, 流体の圧送と抜き出しが可能な EHD ポンプを駆動源とすることに加え, Y方向にふくらみやすい蛇腹型の構造体を用いることで, 低印加圧力での駆動を可能としており, 高弾性の膨張体を用いている従来の McKibben 型人工筋と比べ収縮力の発生に必要な印加圧力を低減している. また, EHD 人工筋は常に紐の角度が一定となる構造であるため, 発生する収縮力は収縮率に依存せず, 印加圧力に応じた収縮力の発生が可能な特性を持つといえる. この構造は, 必ずしもリングを使用する必要はなく, 常に紐の角度が直角になる構造であれば印加圧力に応じた収縮力を得ることが可能だと言える.

## 5.2 EHD 人工筋を駆動源とするロボット駆動機構への応用

開発した高流量型の流体駆動源によってこれまで実現が困難であった EHD 駆動の人工筋アクチュエータを開発することができたため、次の段階として流体駆動源と EHD 人工筋のソフトロボティクスへの応用として、生体の動作を模倣したロボットを試験的に動作させることとし、魚の動きを模倣した尾ヒレの駆動機構の製作と動作の確認を行った。

### 5.2.1 考案した尾ヒレ駆動機構

考案した尾ヒレ駆動機構を図 5-20 に示す。4 章で考案した高流量 EHD ポンプの上下に開発した EHD 人工筋を配置し、人工筋の紐によって軸を回転させることで尾ヒレが動作する構造であり、EHD ポンプで流体を圧送、吸引することで、上下の EHD 人工筋を交互に収縮、弛緩させて尾ヒレを揺動させることが可能である。



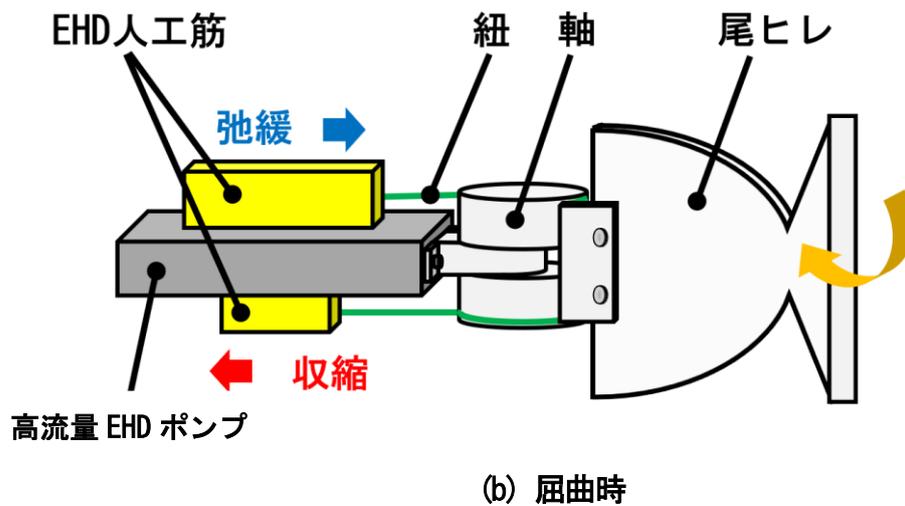


図 5-20 考案した尾ヒレ駆動機構のイメージ

尾ヒレ駆動機構を製作するにあたり、魚型海中ロボットの体長を 400[mm] とした。また、魚型海中ロボットの尾ヒレが水中での揺動時にかかるトルクについて計算を行い、それを参考に EHD 人工筋および高流量 EHD ポンプの目標性能を決定することとした。

尾ヒレが水中で揺動するときに水から受けるトルク  $T_0$ [N・m]は、尾ヒレが受ける抗力  $F_0$ [N]と、尾ヒレの付け根から重心までの距離  $r$ [m]から、(5.5)式で求められる。なお、 $r$  は約 0.1[m]とした。

$$T_0 = F_0 r \quad (5.5)$$

(5.5)式に使用する  $F_0$ は、抵抗係数  $C_D$ 、水の密度  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>]、尾ヒレの重心が揺動する速度  $v$ [m/s]、尾ヒレの面積  $S$ [m<sup>2</sup>]から、(5.6)式で求められる。なお、 $C_D$  は尾ヒレを一枚の平板としたときの値である 1.2、 $\rho$  は水の密度である 1000[kg/m<sup>3</sup>]、 $S$  は 0.015[m<sup>2</sup>]とした<sup>48)</sup>。

$$F_0 = \frac{1}{2} C_D \rho v^2 S \quad (5.6)$$

(5.6)式に使用する揺動速度  $v$  は、重心までの距離  $r$ 、尾ヒレの周波数  $f$  [Hz]、尾ヒレの揺動角度  $\theta$  [deg] から、(5.7)式で求められる。なお、 $f$  は 0.5 [Hz] を目標値とし、 $\theta$  は実際の魚が泳ぐときの角度を目標に、24 [deg] とした。

$$v = 2\pi fr \sin \theta \quad (5.7)$$

(5.5)式に(5.6)、(5.7)式を代入すると、

$$T_0 = 2C_D \rho (\pi f \sin \theta)^2 S r^3 \quad (5.8)$$

となる<sup>48)</sup>。このトルク  $T_0$  を用いることで、図 5-21 のようにモーメントのつりあいから紐の張力、すなわち人工筋の収縮力  $F_s$  [N] と回転軸の直径  $d$  [m] の関係式が立てられる。なお、直径  $d$  は大きいほど必要な収縮力が小さくなるため、機構に組み込むことが可能な最大の値である 0.04 [m] とすると、

$$T_0 = F_s \cdot \frac{d}{2} \quad (5.9)$$

$$F_s = \frac{2T_0}{d} \quad (5.10)$$

となり、収縮力  $F_s$  が求められる。したがって、魚型海中ロボットの体長を 0.4 [m] としたときに尾ヒレが揺動するために必要な EHD 人工筋の収縮力は、(5.10)式より約 0.8 [N] である。

図 5-22 に内蔵する EHD 人工筋のイメージ図を示す。EHD 人工筋の収縮量は収縮時の高さで決まるため、大きい収縮量を発揮するためには蛇腹型の膨張体を高く設計する必要があり、装置へ組込むことが困難になる。そこで、EHD 人工筋の高さを変えずに高い収縮量を発揮可能な構造を考案した。この EHD 人工筋は高収縮量を発揮するために上下のボード(上板と下板)にベアリングを搭載した回転軸を取り付け、そこで紐を折り返した構造である。これにより折り返した回数に応じて収縮量を人工筋の高さ分増加させることが可能である。下板を固定した場合に EHD ポンプから蛇腹型の膨張体へ絶縁性流体が圧送され膨張体

が膨張すると上板が上がり、EHD 人工筋は収縮する。このときの紐にかかる力が、人工筋の収縮力であり、5 章 1 節で製作した EHD 人工筋と同様に常に紐の角度が直角となる構造であるため、発生する収縮力の算出式に収縮率は介在せず、印加圧力に応じた収縮力の発生が可能である。

収縮力と圧力の関係の概略図を図 5-23 に示す。収縮時に上板に対して圧力がかかることで収縮力を発生させるため、膨張体と上板の接触面積と加える圧力から収縮力を概算できる。まず、膨張体と上板の接触面積を  $A[\text{m}^2]$ 、膨張体と上板の接触面の直径を  $D[\text{m}]$  とおく。下板を基準面とし、膨張体内に圧力  $P[\text{Pa}]$  を加えると  $A$  に対して力  $F[\text{N}]$  が発生する。そして、紐にかかる力は下板のベアリングが定滑車、上板のベアリングが動滑車と同じ振る舞いとなり、EHD 人工筋が発揮する収縮力は  $F/4$  となる。この収縮力が (5.10) 式の収縮力  $F_S$  となる。収縮力の概算式を下記に示す。

$$F_S = \frac{F}{4} \quad (5.11)$$

このとき、 $P$  と  $F$ 、 $A$  の関係は、

$$P = \frac{F}{A} \quad (5.12)$$

$$F = PA \quad (5.3)$$

である。ここで  $A$  は、

$$A = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \quad (5.14)$$

であり、(5.11) 式に (5.3)、(5.14) 式を代入すると、

$$F_S = \frac{1}{4} P \cdot \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \quad (5.15)$$

と概算できる。また、(5.15) 式を変形し、

$$P = \frac{16F_S}{\pi D^2} \quad (5.16)$$

とすることで、(5.10)式で求めた収縮力から人工筋に加える圧力を概算することができる。本研究で用いる EHD 人工筋は直径  $D$  を  $0.03[\text{m}]$  としたため、収縮力  $0.7[\text{N}]$  を達成するために必要な圧力は、(5.16)式より約  $4.3[\text{kPa}]$  である。

また、尾ヒレが回転するために引く紐の量、すなわち EHD 人工筋の収縮量  $L[\text{m}]$  については、(5.17)式から求められる。

$$L = \frac{\pi d}{2} \cdot \frac{2\theta}{180} \quad (5.17)$$

したがって、EHD 人工筋に必要な収縮量は、約  $16.8[\text{mm}]$  である。

以上より、EHD 人工筋の目標収縮力を  $0.7[\text{N}]$ 、目標収縮量は  $17[\text{mm}]$  とした。また、この目標を達成するため、 $6[\text{kV}]$  印加時の双方向 EHD ポンプの目標吐出圧力は安全率を考え必要な圧力の約  $3.5$  倍の値である  $15[\text{kPa}]$  とした。

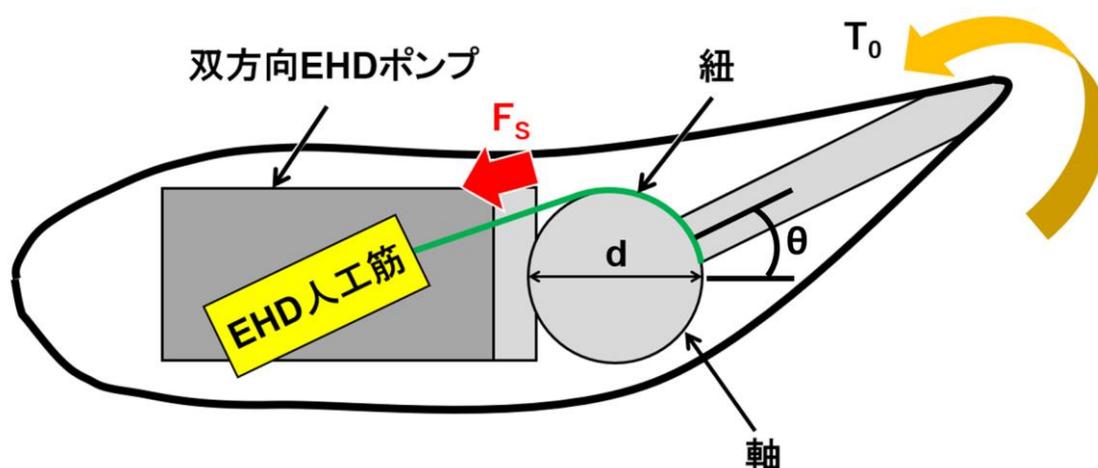


図 5-21 尾ヒレ駆動機構のモーメントのつりあい

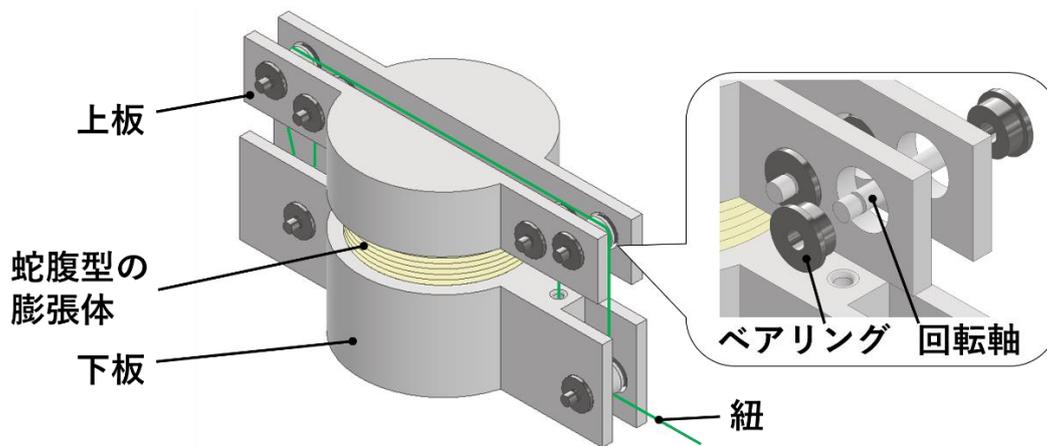


図 5-22 尾ヒレ駆動用 EHD 人工筋のイメージ

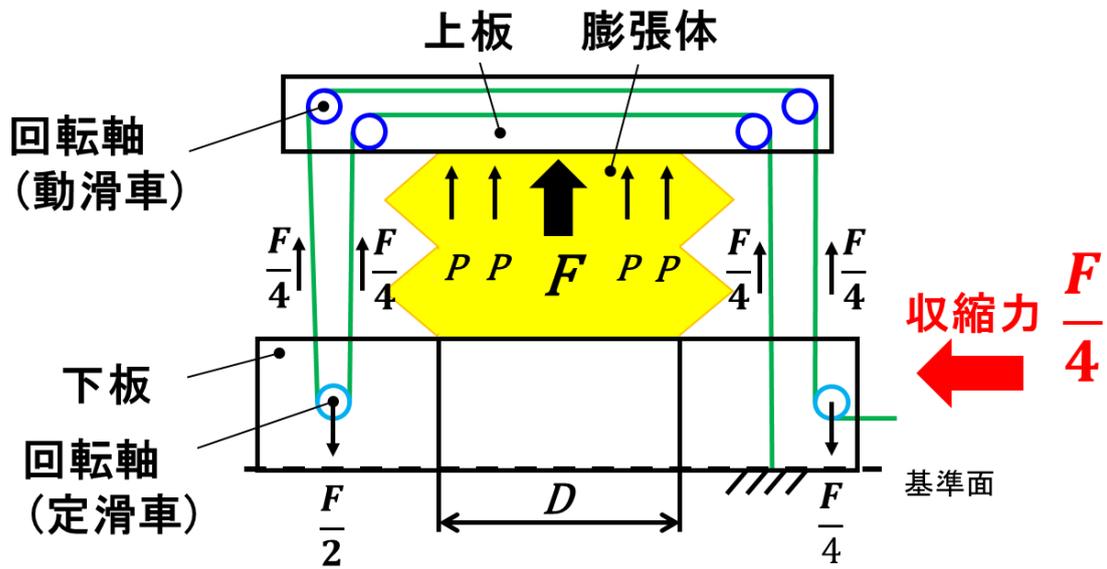


図 5-23 収縮力と圧力の関係の概略図

## 5.2.2 製作した高流量 EHD ポンプ

上述した目標値を元に製作した高流量 EHD ポンプを図 5-24 に示す。寸法は  $115 \times 30 \times 49$  [mm] であり、流体の吐出方向を方向 1、方向 2 と定めた。前述した目標性能を達成するため、高流量 EHD ポンプの構造は、図 5-25 に示すように正極の両側に負極を双方向に 6 段ずつ並べ、流路は 2 並列とした。電極の各寸法は図 5-26 および表 5-1 の通りである。また、この電極構造で発生する電界が第 3 章で示した解析結果と同様か確認するために同様の条件で電界解析を行った。図 5-25 と同様の向きでの有限要素モデルを図 5-27 に示す、黄色の要素が電極、青色の要素が液体、グレーの要素がレジンを示しており、中心の正極に電圧印加した状態を定義した。要素数は約 458 万である。解析結果を図 5-28 に示す。図 5-28 からこの電極構造においても問題なく EHD 現象が発生する電界を確認した。

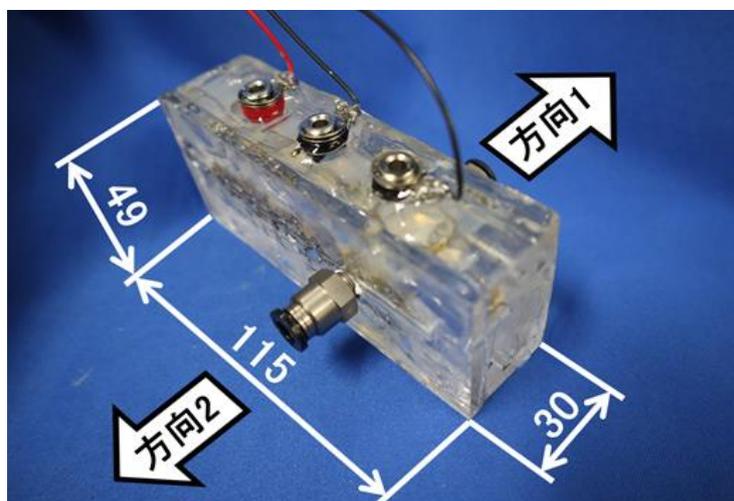


図 5-24 高流量 EHD ポンプの外観

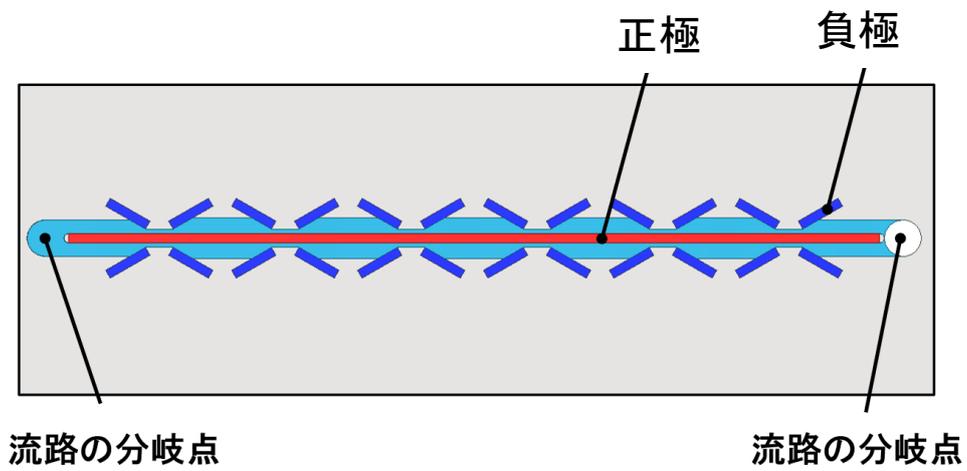


図 5-25 高流量 EHD ポンプの構造

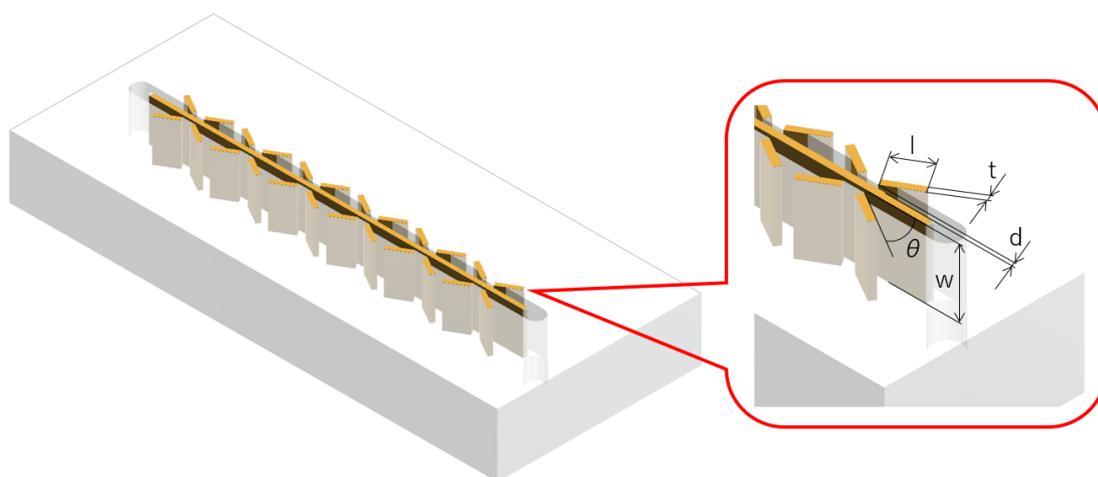


図 5-26 電極の寸法

表 5-1 電極の寸法

項目	内容
電極長さ : $l$	5 [mm]
電極厚さ : $t$	1 [mm]
電極幅 : $w$	10 [mm]
電極間隔 : $d$	0.5 [mm]
電極角度 : $\theta$	30 [deg]

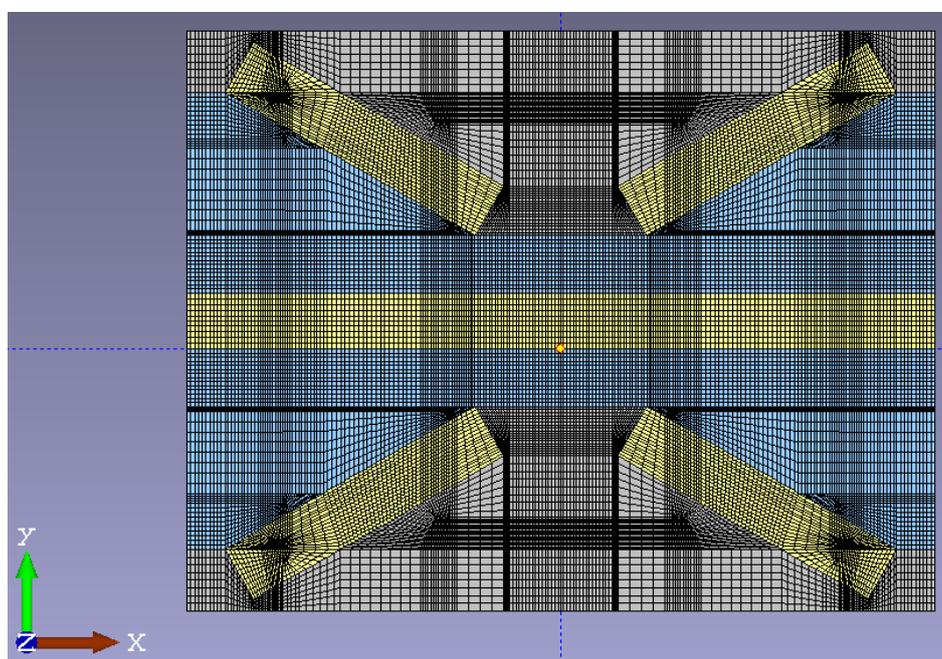


図 5-27 高流量 EHD ポンプの構造

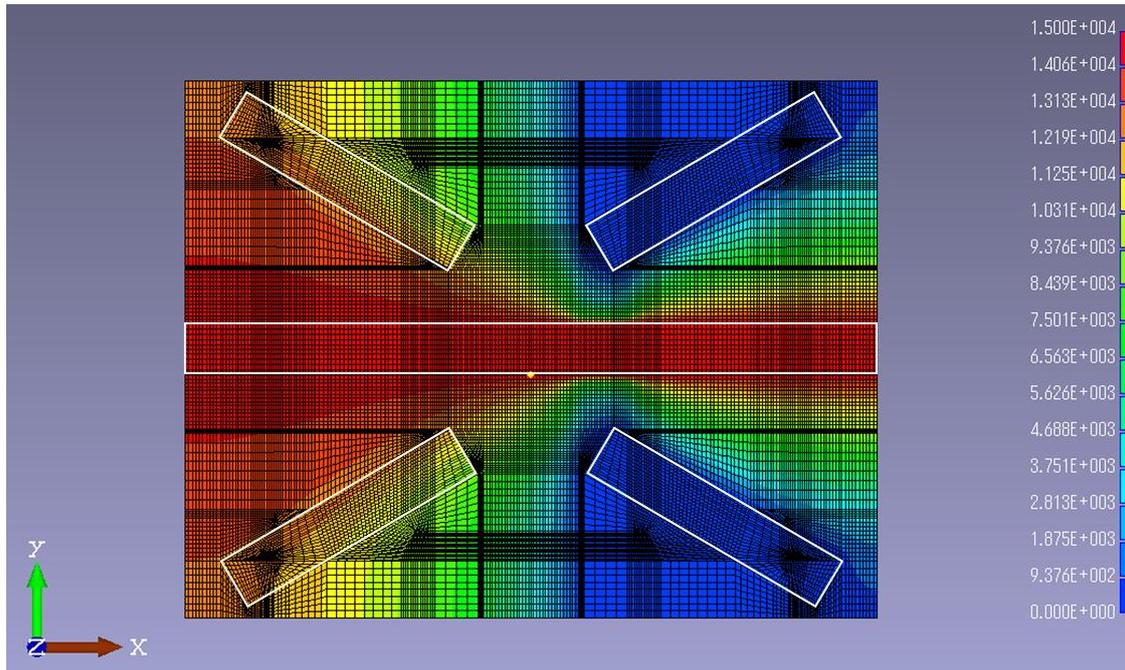


図 5-28 高流量 EHD ポンプの電界解析結果

この高流量 EHD ポンプの性能評価のため、吐出圧力・流量の測定を行った。測定方法は図 5-29 のように電源(松定プレシジョン製 PL-18-2)、昇圧器(松定プレシジョン製 HQ-15P(A))、高流量 EHD ポンプ、圧力計(SMC 製 ZSE40AF-01-X-M)、バルブ、流量計(ソニック製  $\mu$  LF-300S)、リザーバを接続し、圧力測定時はバルブを閉じ、流量測定時はバルブを開いて行った。なお、印加電圧は 0[kV]から 6[kV]まで 1[kV]間隔とし、測定回数は各 3 回とした。また、方向 1 について測定した後、方向 2 について同様に測定した。

吐出圧力は図 5-30 に示すように、印加電圧の上昇に対し 2 次曲線状に上昇した。6[kV]印加時の平均吐出圧力は方向 1 が 16.2[kPa]、方向 2 が 18.6[kPa]であった。また流量は図 5-31 に示すように、印加電圧の上昇に対し直線的に上昇した。6[kV]印加時の平均流量は方向 1 が 4.7[mL/s]、方向 2 が 5.3[mL/s]であった。以上のことから、製作した高流量 EHD ポンプは方向 1、方向 2 どちらも 6[kV]印加時に目標値である 15[kPa]を達成した。ここで、印加電圧 1[kV]における流量が他の電圧での傾向から外れている理由としては、圧力測定結果から分かるように 1[kV]印加時はほとんど圧力が発生しておらず僅かな流動しか発生しなかったためだと考えられる。また、2 つの方向での圧力、流量の差については第 4 章での考察にもあった電極のずれが原因であると考えられ、実際に機器に組み込む際にはマイコンなどで印加電圧を調整することで対応可能である。

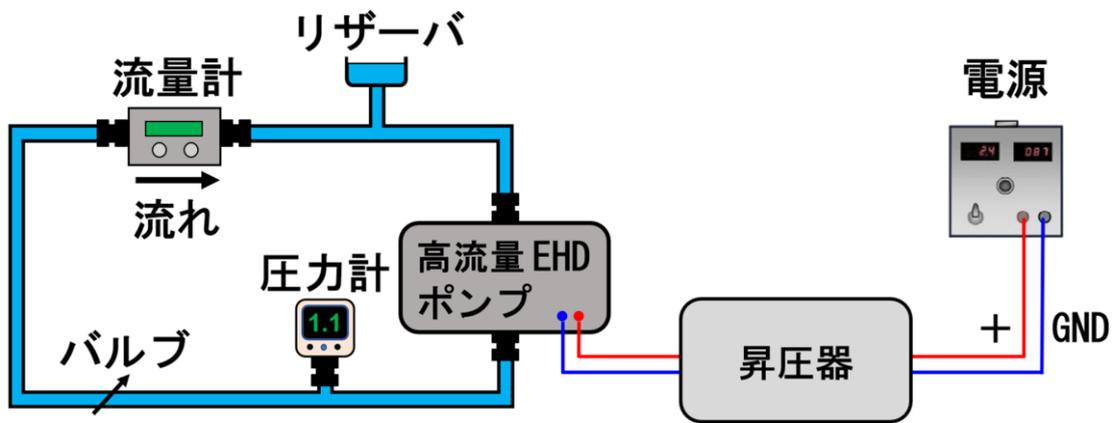


図 5-29 吐出圧力・流量の測定装置

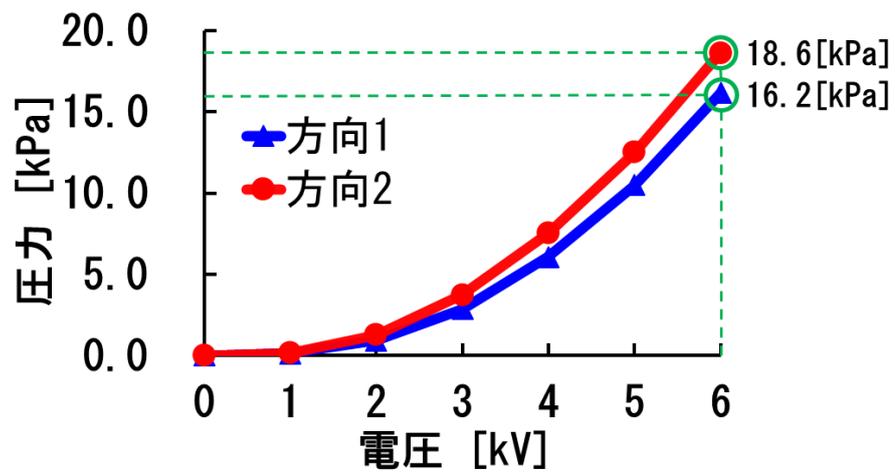


図 5-30 EHD ポンプの吐出圧力測定結果

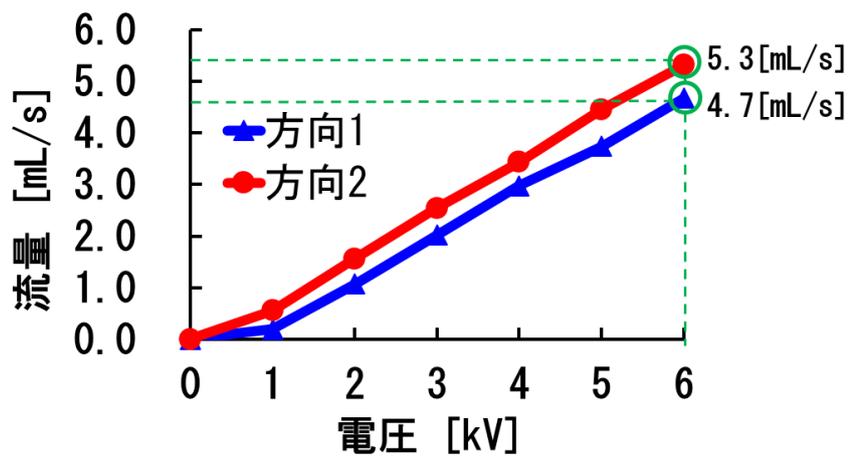
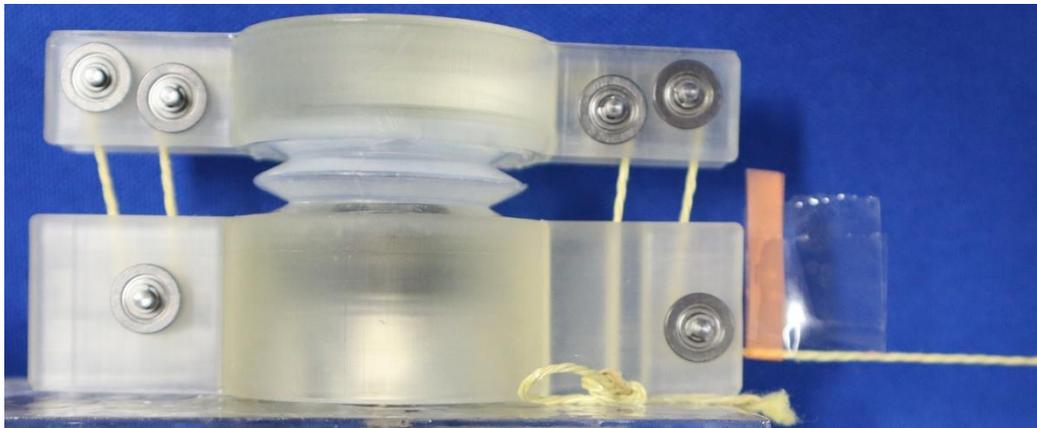


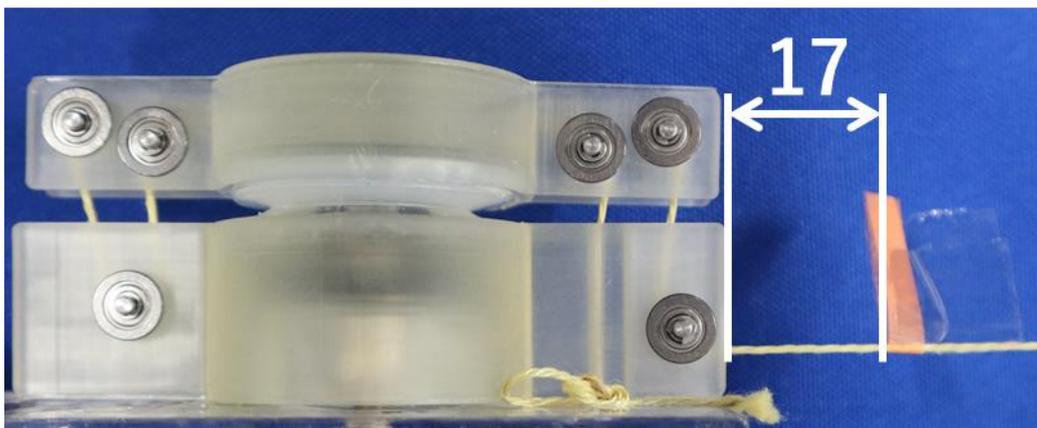
図 5-31 EHD ポンプの流量の測定結果

### 5.2.3 製作した EHD 人工筋

製作した EHD 人工筋を図 5-31 に示す. 図 5-32(a)が収縮時, 図 5-32(b)が弛緩時の様子であり, この EHD 人工筋の収縮量を測定したところ目標値である 17[mm]であったため, この EHD 人工筋を 2 台用意しそれぞれ人工筋 1, 人工筋 2 と定め, 性能評価のため収縮力の測定を行った. なお, 収縮力の測定には 5 章 1 節 4 式で記載した図 5-14 の測定装置を用いた.



(a) 収縮時



(b) 弛緩時

図 5-32 製作した EHD 人工筋

収縮力の測定結果を図 5-33 に示す。グラフから印加圧力の上昇に対し直線状に収縮力が上昇した。また、15[kPa]時の平均収縮力は人工筋 1 が 1.21[N]、人工筋 2 が 1.03[N]であった。以上より、目標性能としていた双方向 EHD ポンプに 6[kV] 印加したときの EHD 人工筋の収縮量 17[mm]および収縮力 0.7[N]を達成したため、これらを組み込んだ尾ヒレ駆動機構を製作した。

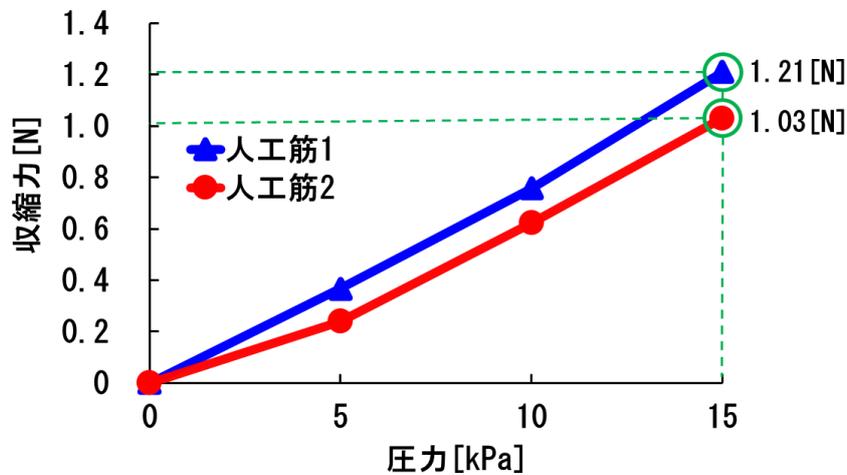


図 5-33 収縮力の測定結果

## 5.2.4 尾ヒレ駆動機構の製作および動作試験

製作した尾ヒレ駆動機構の外観を図 5-34 に示す。この尾ヒレ駆動機構は高流量 EHD ポンプ、2 つの EHD 人工筋、軸、尾ヒレで構成され、寸法は  $350 \times 120 \times 60$ [mm]である。製作した尾ヒレ駆動機構の動作を確認するための実験として、最大振幅角度の測定を行った。本来は水中での測定が望ましいが、あくまで動作の確認として空気中で測定を行うこととし、揺動周期は参考値とした。測定結果を図 5-35 に示す。空気中で操作させた様子を上から撮影しており、最大振幅角度は  $14$ [deg]、揺動周期は  $2$ [Hz]の動作速度を発揮することを確認した。最大振幅角度が目標値の半分程度になった理由としては EHD 人工筋の膨張体が歪み、動作時に斜めに傾いてしまい想定していた収縮力、収縮量を発揮できなかったと考えられる。そのため、EHD 人工筋の上下のボードにガイドを取り付けるなど傾きを抑える構造を組み込むことができれば設計通りの動作に近づくと考えられる。

また、駆動時に機構の摩擦による音が僅かにするのみで高い静音性を有しており、尾ヒレ駆動時に動作中の尾ヒレに手で負荷を与えても流体が逆流することで駆動源にダメージを与えることなく負荷を受け流すことを確認した。

以上のことから、開発した流体アクチュエータとそれを駆動源としたロボット駆動機構は EHD 現象の持つ静音性、柔軟性、を有しており、かつ高流量の吐出により目標には届かなかったものの中・大型装置への応用の可能性を示した。

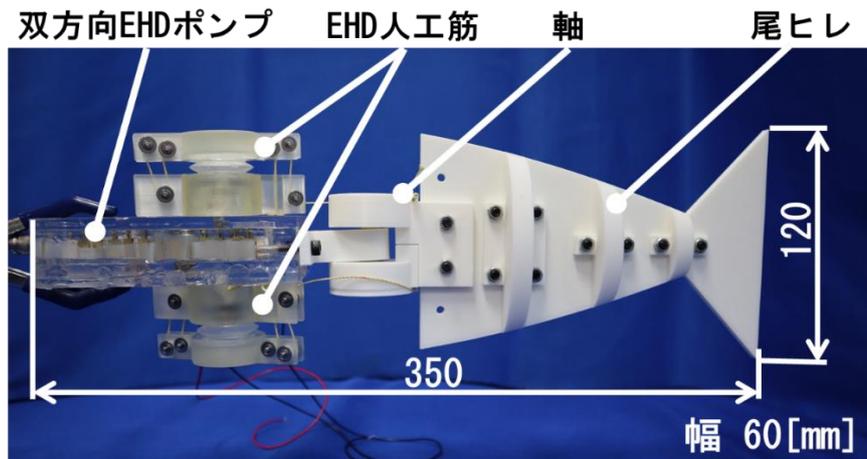
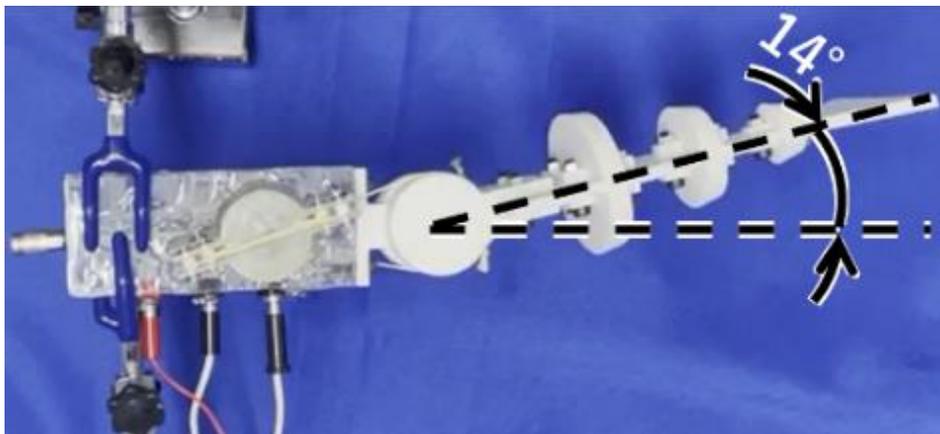
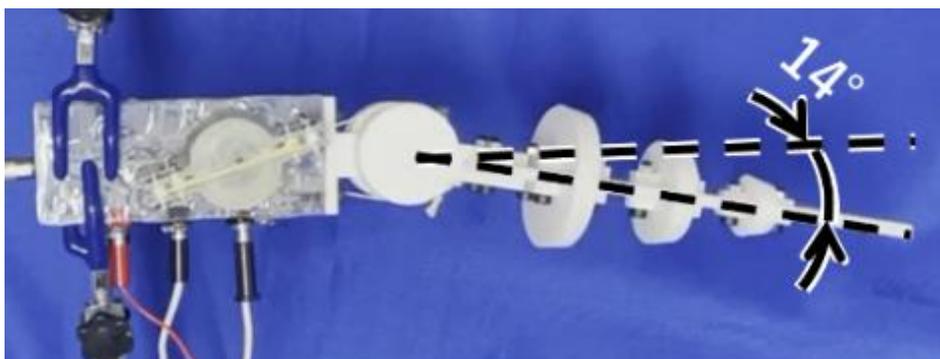


図 5-34 製作した尾ヒレ駆動機構の外観



(a) 右側への尾ヒレの揺動



(b) 左側への尾ヒレの揺動

図 5-35 動作実験の結果

### 5.3 考察

開発した EHD 人工筋を駆動源とすることで、目標値には届かなかったものの魚型ロボットの駆動を想定した尾ヒレ駆動機構の動作を確認した。このことから、既存のロボット、特に人工筋を駆動源としたロボットに対しては高流量 EHD ポンプおよび EHD 人工筋を応用することが可能であり、EHD アクチュエータのさらなる応用性を示した。

これまでに開発されてきた EHD ポンプ(ECF ポンプ)および EHD アクチュエータは流量吐出性能が微小であるため、マイクロアクチュエータなど小型機器への応用に主軸が置かれ、研究が続けられてきた。これに対して、電極幅の増加させた電極構造の開発により、これまで困難であった EHD 現象による高流量の吐出を可能とした。これにより EHD 人工筋の様に液体で容積を満たすことにより力を発揮するアクチュエータの開発が可能となった。開発した EHD アクチュエータは EHD 現象の有する静音性、柔軟性、そして優れた制御性を持ち、機械的駆動部も存在しない新しい形態の流体駆動アクチュエータであると言える。

## 第6章 結論

本研究では, EHD 現象を応用した高流量を吐出可能な新たな流体駆動源の開発とそのロボット駆動機構への応用を目的として, 以下の検討を行った.

1. 流体力学に基づく EHD ポンプの高流量化の手法の考案および, 電界解析による考案手法の検討
2. 考案手法に基づく新たな流体駆動源の開発
3. 開発した高流量 EHD ポンプによる駆動に適した新たな流体駆動アクチュエータの開発およびそれを駆動源としたロボット駆動機構の構築

以上の項目について本論文では次のようにまとめた.

1. 流体力学に基づく EHD ポンプの高流量化の手法の考案および, 電界解析による考案手法の検討

第3章では, EHD 現象の発生原理が不明確であることからメカニズムに基づいた高流量化は困難であるため, EHD 象発により発生する流体の運動に着目した. そして, 流体力学に基づいた高流量化の手法を考案し, EHD 現象においては流路断面積の増加による高流量化が適していることを述べ, 流路の拡幅化と並列化の2つの手法を提案した. また, すでに著者らのグループで明らかにした電氣的な特徴の中で, 提案手法を EHD 現象として捉えた場合に起こる配線部で発生する電界が影響を与える可能性について述べ, 電界解析を用いて検討を行った. そして, 電極構造によって発生する電界に対して配線部から発生する電界が与える影響と電極幅の関係性を明らかにし, 高流量化の手法として EHD ポンプの拡幅化と並列化どちらの手法においても基準となる電極幅を定めた.

## 2. 考案手法に基づく新たな流体駆動源の開発

第4章では、3章で提案された手法をもとに EHD ポンプを並列化および拡幅化した高流量 EHD ポンプの製作を行った。そして、基準となるEHDポンプおよび、2並列の高流量EHDポンプ、4並列の高流量EHDポンプ、電極幅を2倍、4倍に拡幅したEHD ポンプを製作し、性能評価実験を行った。その結果、基準ポンプの約1.8倍と約3.5倍の流量の吐出を確認し、高流量型 EHD ポンプの開発に成功した。また、吐出圧力に関しては並列数、電極幅に関わらず一定であるため、高流量かつ低圧力が必要な機器への応用も可能であり、近年の、マイクロマシンへの応用に注力していた EHD 現象の研究に対してこれまで想定されていない中・大型マシンへの応用の可能性を示した。

## 3. 開発した高流量 EHD ポンプによる駆動に適した新たな流体駆動アクチュエータの開発およびそれを駆動源としたロボット駆動機構の構築

第5章ではまず、開発した高流量 EHD ポンプでの駆動に適した液圧アクチュエータについて検討し、EHD 現象の持つ、流体アクチュエータ特有の柔軟性やヒステリシスが無いことによる制御性の高さからソフトロボティクスへの応用が適していると述べた。そして、ソフトロボティクスに関連する研究の中でも生体の筋肉を模倣したアクチュエータである人工筋肉(McKibben 型人工筋)に着目し、その特徴と問題点である駆動圧力の高さと幾何学的な要素が多く含まれていることによる制御性に関して述べた。そして、McKibben 型人工筋の問題点を解決可能なアクチュエータとして高流量 EHD ポンプによる駆動に適した、EHD 人工筋を考案した。EHD 人工筋は蛇腹型の膨張体の上下にボードを配置しその間に紐を通した構造であり、上下を結ぶ紐から常に直角に収縮力を発揮することで、発揮される収縮力は収縮率の影響を受けない。そして実際に開発した EHD 人工筋の性能評価の結果、収縮率に関わらず、常に印加圧力に応じ

た収縮力を発揮し、かつ低圧駆動が可能であることを示した。

そして、開発したEHD人工筋を駆動源としたロボット駆動機構として、全長 400[mm]の魚型ロボットの駆動を想定した尾ヒレ駆動機構の設計・製作を行い実際に駆動機構が動作することを示した。

以上に示したように、本研究では、流体力学に基づいた高流量化手法と電界解析によって、これまで取り組まれてこなかった EHD ポンプの高流量化を行った。これにより従来の EHD ポンプにはない考えに基づいて高い流量吐出性能を有した EHD ポンプを開発した。

さらに、高流量の EHD ポンプを開発したことにより、これまで応用ができなかった分野へ EHD ポンプ適用することが可能となったため、ソフトロボティクス分野の中でも生体の筋肉を模した人工筋に着目し、従来の問題点を解決した EHD 人工筋を開発した。そして、高流量EHDポンプを駆動源とした新たな液圧アクチュエータによって、メートルオーダーサイズの機器の駆動を想定したロボット駆動機構の動作に成功し、これまでの EHD 現象の研究では困難であった大型の機器への応用を実現した。

よって、高流量 EHD ポンプおよび EHD 人工筋の開発によって、これまでは吐出性能の低さから諦められていた分野への応用と更なる発展の可能性を示した。

## —謝辞—

本研究の遂行ならびに本論文をまとめるにあたり，様々な方々に多大なる御指導・御鞭撻・御協力を賜りました．ここに深く御礼申し上げます．

本研究を行うにあたり，数々の御配慮と御指導をいただきました東京電機大学工学部先端機械工学科教授 三井和幸先生に深く感謝申し上げます．

また，本研究を進めるにあたり，工学面からの御指導と御助言をいただきました，三洋金属工業株式会社代表取締役の下大川丈晴様，同社開発本部主任研究員の寺阪澄孝様に心より厚く御礼申し上げます．

本研究をまとめ，論文を作成するにあたり，適切な御指導・御助言をいただきました東京電機大学理工学部理工学科電子工学系教授 大西謙吾先生，東京電機大学工学部先端機械工学科准教授 桑名健太先生，東京電機大学理工学部理工学科電子工学系准教授 住倉博仁先生，に深く御礼申し上げます．

また，日頃御忙しい中，暖かい御助言・御指導を頂いた東京電機大学大学院先端科学技術研究科先端技術創成専攻博士課程 2 年村田隼人さん，東京電機大学大学院工学研究科先端機械工学専攻修士課程 2 年の牛山和輝さん，公門祐太さん，清野龍也さん，武井健悟さん，石原亮裕さん，根本拓実さん，修士課程 1 年の石川龍さん，福澤秀紀さん，高橋和彦さん，に謹んで感謝致します．さらに，東京電機大学工学部先端機械工学科 4 年の松井孝憲さん，染谷陸来さん，林由都さん，松島利宣さん，伊津野武史さん，萩原沙也加さんに感謝致します．そして，研究室と私生活において 8 年間苦楽を共にし，様々な面でサポートして頂きました，東京電機大学大学院先端科学技術研究科先端技術創成専攻博士課程 3 年の羅偉烽さんに深く感謝致します．

最後に，研究生活を温かく見守っていてくれ，応援してくれた両親と弟に感謝致します．

## 〈参考文献〉

- 1) 楠田 喜宏：ロボット技術の変遷 (II)，電気学会誌，126 巻，6 号，2006 年，pp.378-381
- 2) 河野 寿之：安川電機のロボット開発の歩み，電子情報通信学会 通信ソサイエティマガジン，10 巻，3 号，2016 年，pp.138-144
- 3) 細田 耕：ソフトロボティクスの歴史と現状，今後の展望，日本ロボット学会誌，37 巻，1 号，2019 年，pp.7-11
- 4) 新山龍馬：ソフトロボティクスはどこから来てどこへ行くのか，日本ロボット学会誌，Vol37，No1，pp.16-21，2019
- 5) Dragomir Nenchev：「ソフトロボティクス」特集について，日本ロボット学会誌，Vol.17，No.6，p.755，1999
- 6) 杉本 浩一：コンプライアンス制御の現状と今後の課題，日本ロボット学会誌，11 巻，1 号，1993 年，pp.26-30
- 7) 中村太郎：図解 人工筋肉—ソフトアクチュエータが拓く世界—，日刊工業新聞，2011
- 8) 日本機械学会編：機能性流体・知能流体，p.2，2000
- 9) 静電気学会編：新版 静電気ハンドブック，オーム社，pp.914-935，1998
- 10) 横田眞一，貞本敦史，近藤豊，大坪泰文，枝村一弥：電界共役流体(ECF)を応用したマイクロモータ：ステータ電極(SE)形マイクロ ECF モータの提案，日本機械学会論文集 C 編，66 巻，642 号，pp.627-633，2000
- 11) 横田眞一，根本敏之，近藤豊，大坪泰文，枝村一弥：電界共役流体(ECF)を応用したマイクロモータ：ロータ電極(RE)形マイクロ ECF モータの提案，日本機械学会論文集 C 編，66 巻，651 号，pp.3799-3804，2000

- 12) 数元伊之助：液状誘電体が電極を上昇する現象，応用物理，Vol25，No.6，pp.264-265，1956
- 13) 赤木 徹也，堂田 周治郎，松下 尚史：EHD 流体を用いたポンプモジュールの試作，日本機械学会論文集 C 編，68 巻，673 号，pp.2614-2619，2002
- 14) 花岡 良一，高田 新三，村雲 正敏，安齋 秀伸：液体誘電体中の EHD ポンピングによる液体ジェット特性，電気学会論文誌 A，121 巻，3 号，pp.224-230，2001
- 15) 中野 茂，佐藤 正毅：垂直方向送液用電気流体力学ポンプの安定動作条件，電気学会論文誌 B，122 巻，1 号，pp.5-10，2002
- 16) 横田 眞一，徐 佑昔，吉田 和弘，枝村 一弥：電界共役流体 (ECF) を応用した電子チップ液冷用平面薄形ポンプ，日本機械学会論文集 C 編，71 巻，709 号，pp.2798-2804，2005
- 17) 金 俊完，尾川 宜嗣，横田 眞一，吉田 和弘，枝村 一弥：MEMS 技術による ECF ジェットアクチュエータの高出力化，第 51 回自動制御連合講演会，自動制御連合講演会講演論文集，pp.30-31，2008
- 18) 竹山説三：電磁気學現象理論，丸善，p.123，1950
- 19) O.M.Stuetzer：Ion drag pumps，J.Appl.Phys，Vol.31，pp.136-146，1960
- 20) P. Atten and M. Haidara：Electrical Conduction and EHD Motion of Dielectric Liquids in a blade-plane electrodes assembly，IEEE Trans. Elect. Ins.，Vol.20，No.2，pp.187-198，1985
- 21) 松川 豊：イオンドラッグ型 EHD マイクロポンプ内流れの数値シミュレーション，日本機械学会論文集，84 巻，858 号，p.17-00358，2018

- 22) A.P. Washabauch, M. Zahn, J.R. Melcher : Electrohydrodynamic traveling-wave pumping of homogeneous semi-insulating liquids, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol.24, No.5, pp.807-834, 1989
- 23) James R. Melcher : Traveling - Wave Induced Electroconvection, Phys. Fluids, Vol.9, pp.1548-1555, 1966
- 24) P. Atten, J. Seyed-Yagoobi : Electrohydrodynamically induced dielectric liquid flow through pure conduction in point/plane geometry, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.10, No.1, pp.27-36, 2003
- 25) 花岡 良一, 中道 裕之, 高田 新三, 深見 正 : 同軸円筒電極系による EHD 液体ジェットの流動特性, 静電気学会誌, 28 巻, 6 号, pp.316-321, 2004
- 26) 花岡 良一, 細谷 直輝, 高橋 尉治朗, 高田 新三, 深見 正 : EHD 液体ジェット発生用の実用的電極系と液体ポンピング特性, 電気学会論文誌 A, 127 巻, 12 号, pp.769-776, 2007
- 27) 竹村 研治郎, 横田 眞一, 枝村 一弥 : 電界共役流体に発生するジェット流を用いたマイクロ人工筋アクチュエータ, 日本機械学会論文集 C 編, 71 巻, 708 号, pp.2571-2577, 2005
- 28) 山口 彰浩, 竹村 研治郎, 横田 眞一, 枝村 一弥 : 電界共役流体を用いたポンプ・タンク一体型液圧駆動ロボットフィンガ, 日本機械学会論文集 C 編, 76 巻, 772 号, pp.3689-3695, 2010
- 29) 横田 眞一, 洪 榮杓, 竹村 研治郎, 枝村 一弥 : 電界共役流体により駆動されるミミズ型ぜん動駆動マイクロマシン, 日本ロボット学会誌, 25 巻, 6 号, pp.938-943, 2007

- 30) 小林 紀穂, 倉科 佑太, 竹村 研治郎, 横田 眞一, 枝村 一弥 : 電界共役流体を用いた Droplet  $\mu$  TAS のための液滴混合デバイスの開発, 日本機械学会論文集, 80 巻, 819 号, p.MN0332, 2014
- 31) 田原 広規, 新野 俊樹 : MID 工法による EHD ポンプの製造, 生産研究, 69 巻, 6 号, pp.405-408, 2017
- 32) Tasuku Sato, Yoko Yamanishi, Vito Cacucciolo, Yu Kuwajima, Hiroki Shigemune, Matteo Cianchetti, Cecilia Laschi, Shingo Maeda : Electrohydrodynamic Conduction Pump with Asymmetrical Electrode Structures in the Microchannels, Chemistry Letters, Vol.46, No.7, pp.950-952, 2017
- 33) 寺阪澄孝, 工藤周, 三井和幸 : EHD 現象を応用した回転型アクチュエータの開発-EHD モータの開発-, 精密工学会誌, 74 巻, 1 号, pp.87-91, 2008
- 34) 寺阪澄孝, 三井和幸 : EHD 現象を応用した揺動運動型アクチュエータの開発, 日本フルードパワーシステム学会論文集, 42 巻, 5 号, pp.95-100, 2011
- 35) 三井和幸 : EHD 現象利用ポンプの開発とアクチュエータへの応用, フルードパワーシステム, Vol.42, No.1, pp.33-36, 2011
- 36) 寺阪 澄孝. 高圧力 EHD 現象発生のための非対称電極システムの開発とそのアクチュエータへの応用, 東京電機大学大学院先端科学技術研究科博士論文, pp.10-30, 2008.
- 37) 武井 裕輔, 寺阪 澄孝, 下大川 丈晴, 三井 和幸: EHD ポンプを駆動源とした人工筋システムの開発, 日本フルードパワーシステム学会論文集, 53 巻, 2 号, pp.28-35, 2022

〈第2章の参考文献〉

- 38) 中山 遥介, 三井 和幸, 寺阪 澄孝, 下大川 丈晴: 揺動型 EHD アクチュエータを用いた多関節ロボットの開発に関する研究, 精密工学会学術講演会講演論文集, pp.707-708, 2018 年
- 39) 前田 浩行, 大林 治, 金子 和夫, 岩瀬 秀明, 神田 章男, 諸橋 達, 雨宮 将太, 武井 裕輔, 三井 和幸, 前田 睦浩: EHD 現象を利用した新しいターニケットの開発: 合併症がおきない至適圧力の検討, 臨床バイオメカニクス = Japanese journal of clinical biomechanic, 38 巻, pp.389-392, 2017 年

第5章の参考文献

- 40) 杉野真哉, 則次俊郎, 高岩昌弘, 佐々木大輔, 末長大輔: ゴム人工筋を用いた立ち上がり動作支援パワーアシストウェア, ROBOMECH2008 学術講演会論文集(CD-ROM), 2P2-F02, (2008)
- 41) 則次俊郎, 学高雷, 高岩昌弘: ゴム人工筋を用いた人体装着型パワーアシスト装置の開発, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2003 CD-ROM 論文集, No.03-7, (2003)
- 42) 佐々木大輔, 則次俊郎, 山本裕司, 高岩昌弘: 空気圧ゴム人工筋を用いたパワーアシストグローブの開発, 日本ロボット学会誌, Vol.24, No.5, p.640-646, (2006)
- 43) 則次俊郎, 間嶋準平, 守本崇昭, 佐々木大輔, 高岩昌弘: シート状湾曲型空気圧ゴム人工筋を用いたパワーアシストグローブの開発, 日本機会学会 2008 年度年次大会講演論文集(7), p.147-148, (2008)
- 44) 小林宏: ウェアラブルロボットの福祉機器への応用, 日本ロボット学会誌, Vol.20, No.8, pp.805-808, 2002

- 45) 辻内伸好, 小泉孝之, 西野慎哉, 中村陽一郎, 平野正徳 : 空気圧駆動による 5 指筋電義手の開発, PO アカデミジャーナル, Vol.15, No.2, pp.93-100, 2007
- 46) 川嶋健嗣, 豊田晃央 : 空気圧ロボットによる建設機械の遠隔操縦, フルードパワーシステム, Vol.33, No.6, p.363-366, (2002)
- 47) 豊岡 秀典, 趙 菲菲, 谷口 浩成, 湊原 哲也: 空気圧柔軟アクチュエータの改良および応用, 公開研究会・講演会技術と社会の関連を巡って : 技術史から経営戦略まで : 講演論文集, pp.103-104, 2013
- 48) 田中一郎, 永井實: 抵抗と推進の流体力学 - 水棲動物の高速遊泳能力に学ぶ -, 財団法人シップ・アンド・オーシャン財団, pp.16-18,1996