EHD 流体を用いたポンプモジュールの試作*

赤木 徹也*¹, 堂田 周治郎*², 松下 尚史*²

Development of a Pumping Module Using EHD Fluid

Tetsuya AKAGI, Shujiro DOHTA*³ and Hisashi MATSUSHITA^{*3} Department of Assistive and Rehabilitation Engineering, Okayama University of Science,
1-1 Ridai-cho, Okayama-shi, Okayama, 700-0005 Japan

Electro Hydro Dynamics (EHD) fluid is a kind of intelligent fluid. The fluid has the property that a fluid jet flow is generated between two electrodes when a high voltage is applied. DBDN (Di-n-butyl dodecandioate) is a kind of EHD fluid and a dielectric organic liquid. The main purpose of this study is to develop a lightweight and compact fluid actuator which makes use of such properties of EHD fluid. We think that it is useful to apply EHD actuators to a micro actuating system as a lightweight actuator. In order to develop such an actuator, we first investigated the characteristics, the relation between the generated pressure and applied voltage to DBDN fluid. In this study, we tested two kinds of pumping module; a direct type and a suction type. The direct type module consists of two doughnut shaped electrodes. The suction type module consists of a flat plate electrode and a cylindrical electrode. We investigated the relation between applied voltage and generated differential pressure using these modules. Further, we investigated the influence of geometric parameters on the characteristics of the module.

Key Words: Electro Hydro Dynamics Fluid, Ion Drag, DBDN Fluid, Pumping Module, Pumping without Mechanical Moving Part

1. 緒 言

現在の高齢化・少子化社会において、高齢者介護などの福祉分野の労働力不足は、避けがたい問題の一つである。このような状況において介護者の負担を軽減するためのパワーアシストシステムの研究が行われているが、駆動システムは弁・ポンプなどの周辺機器によりシステム全体が大きくなるといった問題を有する。そこで本研究では、EHD 流体^①の特性を利用し、機械的可動部(摺動部)を持たない小型・軽量のポンプの開発を通してコンパクトな駆動システムの開発を目指す。また、このような摺動部のないポンプはマイクロアクチュエータの分野でも有用であり、軽量・コンパクトな駆動システムは産業界を含め多くの分野での応用が期待される。

本論文では、EHD 流体を利用した摺動部のない圧力型ポンプとして二種類のポンプモジュールを試作し、その入力電圧—出力差圧特性を比較するとともに、電極形状が出力差圧に及ぼす影響について検討する。また、ポンプモジュールの動的な評価として、印加電圧に対する発生圧力のステップ応答実験を行った結果に

ついても報告する。

2. E H D 流体および実験装置

2.1 EHD 流体 絶縁性の流体に対して電場を与えると流体内部で対流が発生する。このような現象を示す流体はEHD "Electro Hydro Dynamics" 電気流体力学^②流体と呼ばれる。本実験で用いるDBDN (ドデカ2酸n-ブチル) の場合、直流高電圧を加えると、写真1の矢印のように陽極から陰極に対流が生じる。この流動が発生する原理は十分には解明されていないが、イオンドラッグ^③が一因ではないかと考えられている。すなわち、流体分子は陽極付近でプラス電荷に帯電し、陰極に引き寄せられ、それに伴い両電極間で対流が生じるものと考えられる。

2.2 実験装置および実験方法 本研究で用いた実

Photo.1 View of EHD convection using DBDN

* 原稿受付 2001年5月17日。

*¹ 正員, 津山工業高等専門学校(☎ 708-8509 津山市沼624-1)。

*² 正員, 岡山理科大学工学部(☎ 700-0005 岡山市理大町1-1)。

E-mail: dohta@are.ous.ac.jp

Fig.1 Construction of experimental equipment

験装置の概略を図 1 に示す。実験装置は、最大出力 10kV の直流高電圧安定化電源 (特マクセレック APL-10K1P) と 1 対の電極を含む試作ポンプモジュール、内径 3mm、長さ 1m の 2 本のガラス管と内径 4mm のシリコンチューブからできたマノメータから構成される。実験方法は、直流高電圧安定化電源を用いて 2 つの電極間に 0~10kV の高電圧を加え、その際に発生する出力差圧の定常値をマノメータの液面高さから測定する。ここで、発生圧力 p [Pa] はマノメータの液面高さの差 h [m] と EHD 流体の密度 ρ (DBDN928 [kg/m³])、重力加速度 g (981 [m/s²]) の積 ($p = \rho g h$) で計算する。

3. 直列型ポンプモジュール

3.1 モジュールの構成 図 2 に試作したポンプモジュールの構造を示す。モジュールは外径 10mm、厚さ 5mm の真鍮棒の内側をドーナツ形に加工した円筒電極を 2 個直列に配置し、その外側をアクリル樹脂で絶縁している。また電極間には内径 9mm の穴を設けた厚さ 2mm のアクリル製のスペーサをはさみ流体管路を構成している。モジュール全体の大きさは直径 40mm、幅 28mm である。以後、このモジュールを直列型ポンプモジュールと呼ぶことにする。実験では 2 つのドーナツ形電極の内径を 2, 3, 4, 5mm と変え、また陽極、陰極に内径の異なる数種の電極を用いた場合の特性について検討する。

3.2 入力電圧—出力差圧特性 図 3 に直列型モジュールの実験結果を示す。実験では陽極側電極の内

Fig.2 Construction of direct type of pumping module

径 ϕ_{di} と陰極側電極の内径 ϕ_{do} をパラメータとし、陽極から陰極へ流れる方向に働く圧力を正の差圧として計測した。

図 3(a) に陽極の内径 ϕ_{di} を 5mm 一定として陰極の内径 ϕ_{do} を小さくした場合の結果を示す。図中の記号 $\circ, \triangle, \square, \diamond$ はそれぞれ陰極の内径 ϕ_{do} が 5, 4, 3, 2mm の場合を示す。 $\phi_{di} = 5\text{mm}$, $\phi_{do} = 2\text{mm}$ の場合を除いて全てが本来生じる陽極から陰極への流れと逆方向に圧力が発生している。これは両極間で観測された EHD 対流 (図 3 参照) により、管路抵抗の少ない方向、すなわち内径の大きい方向へ流体が押し出されるように流れを生じたものと推察される。

次に、陽極の内径 ϕ_{di} を 2mm 一定として陰極の内径 ϕ_{do} を大きくした場合の結果を図 3(b) に示す。図中の記号 $\circ, \triangle, \square, \diamond$ はそれぞれ、陽極の内径 ϕ_{di} が 2, 3, 4, 5 mm の測定結果を示す。前述の実験結果 (図 3(a) 参照) と同様に内径の違いにより最大圧力に違いが現れているが、その最大値に規則性はなく、全体として正の圧力差が得られているものの、大きなヒステリシス特性も現れている。この実験では $\phi_{di} = 2\text{mm}$, $\phi_{do} = 4\text{mm}$ の場合において、最大 0.011kPa の出力差圧が得られたが、流体アクチュ

(a) Case of $d_i > d_o$ (b) Case of $d_o > d_i$

Fig.3 Relation between applied voltage and output pressure in the direct type pumping module

エータの駆動源とするには非常に小さな圧力である。圧力が低い原因としては電極間に生じる対流により、圧力の発生に寄与するエネルギーに損失が生じたためと考えられる。

そこで、電極間に生じる対流の影響を軽減するため、EHD 発生流れを 1 つの管路に集中させ、あたかも吸込み動作を行うようにして出力圧力を生じるポンプモジュールを試作した。以後、このモジュールを吸込み型モジュールと呼ぶことにし、これについて次節で検討する。

4. 吸込み型ポンプモジュール

4.1 モジュールの構成 図 4 に吸込み型モジュールの構造を示す。直列型モジュールとの相違点は、電極にテーパ電極と平板電極を使用したところである。テーパ電極は内側にテーパ加工を施し、平板電極は中心から半径 8mm の位置に直径 3mm の流路を 8 つ設けた。そして、これらの電極間はシリコンゴム製のスペーサで挟み流路を設け、電極外部はアクリル樹脂で絶縁した。実験は直列型モジュールの場合と同様に、入力電圧を変えた場合の出力差圧を測定した。

Fig.4 Construction of suction type of pumping module

4.2 入力電圧—出力差圧特性 図 5(a) にテーパ電極を陰極に用いた場合の入力電圧と発生差圧との関係を、図 5(b) に印加電圧と電流の関係を示す。両図の横軸は入力電圧、縦軸は出力差圧と電流を示す。ここで用いたテーパ電極は、最狭部の内径が 2mm、ドーナツ状の端面を基準として片方の内側に 45deg. のテーパ加工を施したものである。図 5 中の記号○、△はそれぞれ印加電圧を 3 回上げ下げした場合の平均値を示し、縦線はデータのばらつきを示す。図 5(a) から、モジュールの出力差圧は印加電圧に対して 2 次曲線状に変化し、最大出力差圧も 1.4kPa 程度と直列型モジュールに比べ約 100 倍高く、ヒステリシスも小さく優れていることが分かる。さらに図 5(b) の電流特性に注目すると、出力差圧の変動に比

(a) Output pressure

(b) Current

Fig.5 Relation between input voltage and output pressure and current

べ電流の変動がやや大きいことが確認できる。これは差圧発生に寄与する因子が電流ではなく、印加電圧の大きさによって決まる物理量、例えば電界などが関与しているためと推察できる。また、モジュールの電流は最大でも 10 μ A 以下と非常に小さく、消費エネルギーも 0.1mW 以下と小さいことが分かる。

4.3 平板電極中心穴の影響 吸込み型モジュールの穴のない電極構造が差圧発生に対して有効であることを確認するため、平板電極中央部に穴を設け、擬似的に直列型モジュールと同様の電極構造に変更し、特性実験を行った。その結果を図 6 に示す。図中の記号○、△、□、▽はそれぞれ平板電極の中央部穴径 ϕ_{DN} が 0, 2, 4, 6mm の場合を示し、 $\phi_{DN}=6$ mm の場合のみ実験途中で絶縁破壊を起こしたため最大印

Fig.6 Relation between input voltage and output pressure of the module with center hole of electrode

加電圧を 4kV とした。図 6 より、平板電極の中心穴径が大きくなるほど出力差圧が小さくなることを確認できる。これは、平板電極中央部の穴により、電極間で流体に加わる力の方向が分散し、直列型モジュールの場合と同様に電極間で対流もしくは平板電極中央部の穴から逆流(図 6 参照)が生じたためと考えられる。

4.4 多段増幅 吸込み型モジュールの発生差圧は直列型に比べ大きく改善されたが、摺動部を有する一般的な流体アクチュエータを駆動させるためには更なる圧力特性の改善が必要である。そこで、1 対の電極(陽極と陰極)で構成される吸込み型ポンプモジュールを直列に接続し、圧力の増幅を行う。その結果を図 7 に示す。実験では 2 組のモジュールを直列に配置し、各々のモジュール間をドーナツ状のシリコンゴムやアクリル樹脂製スペーサにより接続した。図 7 中の記号○、△はそれぞれ 1 段目および 2 段目のみに入力電圧を加えた場合、□は 1 段目(○)と 2 段目(△)それぞれの差圧測定結果を加えたもの、●は 2 組のモジュールに同時に電圧を印加した場合の差圧測定結果を示す。図 7 より、2 段増幅を行った出力差圧と個々の電極ペアを用いた場合の出力差圧の和はほぼ等しく、圧力増幅は個々のモジュールの発生圧力の和で評価できることが分かる。

Fig.7 Relation between input voltage and output pressure of the module in the 2-stage amplifier

4.5 動特性 試作モジュールの動特性の評価としてステップ状に入力電圧を加えた場合の出力差圧の応答を調べる。測定方法としては、高電圧安定化電源を用いモジュールへの電圧をステップ状に変化させた場合の発生圧力を圧力センサ(株コパル電子 HPA-400-102G)を介してデジタルオシロレコーダ(株NEC 三栄 RT3500)で記録した。ここで印加するステップ状電圧の大きさは 8, 9, 10kV であり、ステップ状変化に対する高電圧電源の応答時間(整定時間)は電源メーカーへの問い合わせ結果から約 100ms である。

Fig.8 Transient response of output pressure of the module

図 8 にステップ応答結果を示す。実験に用いたモジュールは、最狭部の穴径が 4mm、電極間距離を 1mm とし、図 6 で用いたものに比べ、テーパ部の形状が少し異なる電極を用いた結果である。また、流体と圧力センサとの間に空気(容積: $1.96 \times 10^{-7} \text{ [m}^3\text{]})$ を介して測定を行った。図よりステップ状電圧が印加されてから、出力差圧が定常値になるまでの時間は約 120ms (むだ時間 20ms, 立ち上がり時間 70ms) であることが分かる。これは電源の動特性(約 100ms)を考慮すると、20ms 以下で電圧から圧力への変換が行われているものと考えられる。

4.6 流量特性 モジュールの出力流量特性として表 1 に印加電圧に対する出力流量の測定結果を示す。流量の測定には、図 1 のモジュール両端に並行して流量計(株KOFLOC 製)を接続し、印加電圧を変えた場合の流量計両端での圧力と流量を調べた。また、流量計は EHD 流体(DBDN)を用いて流量の校正試験を行ったものを用いた。表 1 より流量は 2ml/min ($3.33 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$) 程度であり、極めて小さいことが分かる。そのため、細管内を移動するマイクロロボットなど、大きな容積変化や変位量を必要としないマイクロ流体アクチュエータの駆動源として有効であると思われる。すなわち、本研究で提案するポンプモジュールは圧力型のポンプに類するものである。

Table 1 Output flow rate

Input voltage [kV]	6.0	8.0
Pressure [kPa]	0.27	0.47
Flow rate [m^3/s]	1.67×10^{-8}	3.33×10^{-8}

5. 電極形状の影響

電極形状がモジュールの出力特性に及ぼす影響を検討するため、テーパ電極のテーパ角度、テーパ開口部直径、電極間隔と出力差圧の関係を調べる。

5.1 テーパ角度の影響 テーパ角度が出力差圧に

及ぼす影響を調べるため、図9上部に示す4種類の電極を用いた。電極形状は平板電極との対向面を基準(0deg.)として、15, 30, 45, 60deg. のテーパ加工を施したものである。また、2つの電極間隔は1mmとして実験を行った。その結果を、図9に示す。上下のグラフの縦軸はそれぞれ出力差圧と電流値を示し、横軸は入力電圧を示す。図中の記号○, △は入力電圧を3回上げ下げした場合の出力差圧と入力電流の平均値を示し、各記号の縦線は測定値のばらつきを示す。図9より、テーパ電極を陽極(図の○印)あるいは陰極(図の△印)に用いた両方の場合とも、テーパ角30deg.の場合に高い出力差圧が得られていることが分かる。また、テーパ電極を陰極に用いた方(△)が高い出力差圧が得られている。これはテーパ電極を陰極に用いることで、図10に示すように流体の流れや発生力の生じる方向が1つの流路に集中するためであると考えられる。また、最大電流について比較すると出力差圧の傾向とは異なるものの、全体として出力差圧が高くなると共に、流れる電流も大きくなる傾向が確認できる。

外周部にテーパを設けた電極を用いた結果を図11に示す。テーパ電極は図の上部に示すように、円筒の中心から直径4mmの部分のみ平面部を残し、外周部に15, 30, 45, 60deg.のテーパ加工を施した。

Fig.9 Relation between inner taper angle and maximum output pressure

Fig.10 Flow image of EHD fluid

Fig.11 Relation between outer taper angle and maximum output pressure

また、平板電極とテーパ電極平面部との間隔を1mmとした。図の横軸は、外側テーパ角度を示し、上と下の図の縦軸はそれぞれ入力電圧10kVを印加した時の最大出力差圧と最大電流を示している。なお、図中の記号○, △は図9の場合と同じである。内側テーパ電極を用いた場合に比べ、最大出力差圧も低く、テーパ電極を陰極・陽極に用いた場合の傾向にも一貫性がない。また、実験ではテーパ角度30, 60deg.の場合に、印加電圧の低い場合に逆流を生じる現象も現れた。この原因としては対流の影響によるものと考えられるが、現在のところ原因の解明には至っていない。しかし、全体として、外側テーパ電極は内側テーパ電極に比べ出力差圧が低く、圧力特性に一貫性がなく、ポンプモジュールとしては内側テーパ電極を用いる方がよいといえる。

5. 2 テーパ開口部直径の影響 図12にテーパ開口部直径とモジュール最大出力差圧と最大電流の関係を示す。実験では図の上部に示すように、内側テーパ角度を45deg.一定とし、テーパ開口部直径が4, 6, 8mmのものをを用いた。図の縦軸は最大出力差圧と最大電流を示し、横軸はテーパ開口部直径を示す。図より、テーパ開口部直径が小さくなればなるほど、大きな出力差圧が得られることが分かる。また、最大電流にも同様の傾向が見られる。図の最大電流特性を見ると、テーパ部直径4mmの場合の測定値が大ききばらついている。この原因は、流路が狭くなることにより、流体抵抗が増え、それに伴い電極間での流れの状態が不安定になったためと考えられる。

Fig.12 Relation between sectional inner diameter and maximum output pressure

Fig.13 Relation between electrode gap and maximum output pressure

5. 3 電極間隔の影響 図 13 に電極間隔を 0.5, 1, 2mm と変えた場合の印加電圧 3kV 時の出力差圧を示す。ここで、図中の記号●, ▲, ■, ◆はテーパ電極のテーパ角の違いを示し、それぞれ 15, 30, 45, 60deg. の場合を示す。図 12 から電極間隔が小さくなるほど反比例的に出力差圧が大きくなる傾向が確認できる。これは、電極間隔に反比例する電界の大きさが、圧力の発生に関与しているためと推察される。さらに、図 9 の実験と同様にテーパ角 30deg. の場合に出力差圧が最も大きくなることも確認できる。

以上の結果から、内側テーパ角を 30 deg. とし、テーパ開口部直径を小さく、電極間隔を狭くすることにより、高い出力差圧を得るポンプモジュールが構成できるといえる。

6. 結 言

EHD 流体の特性を利用し、機械的可動部のない小型・軽量のポンプの開発を目指した本研究は以下のように要約される。

- 1) EHD 流体を用いた摺動部のないポンプモジュールとして直列型モジュールと吸込み型モジュールの二種類のモジュールを試作し、入力電圧ー出力差圧特性を調べた。その結果、吸込み型モジュールは直列型モジュールに比べ、100 倍程度高い出力差圧が得られ、ヒステリシス特性も小さく優れていることを確認した。
- 2) 吸込み型モジュールを多段に接続することにより、出力差圧が容易に増幅できることを確認した。また、ステップ応答実験を行った結果、高電圧電源の動特性を含めたシステムの応答は約 120ms であった。高電圧電源の動特性(約 100ms)を考慮すると、電圧印加から差圧発生までの応答は速いといえる。
- 3) 吸込み型モジュールのテーパ電極が出力差圧に及ぼす影響を調べた結果、内側テーパ角 30deg. のとき、極性に関係なく最大出力差圧が得られ、また、テーパ開口部直径が小さく、電極間隔が狭くなるほど高い出力差圧が得られることを確認した。本実験では、1 段のモジュールで最大 3.6kPa の出力差圧が得られた。

以上のように、EHD 流体の特性を利用した摺動部のない新しいタイプの圧力型ポンプモジュールを開発した。

今後の課題として、モジュール電極部の電界解析を行い、出力差圧と電界強度との関係を調べるとともに、出力差圧特性の改善を目指した最適設計を行う予定である。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、試料提供やご助言をいただきました藤倉化成株式会社、安齊秀伸氏、桜井宏治氏の両氏に深く感謝致します。

参考文献

- (1) K.Yamamoto et al. "Powered Suit for Assisting Nurse Labor Employing Muscle Sensor and Sliding Rotary Actuator", Proc. Int. Symp on FLUCOME, Vol.1, (1997-9), 497-501.
- (2) 日本流体力学会編, 第 2 版流体力学ハンドブック, 丸善(1989),947-949.
- (3) William. F.Pickard, "Experimental Investigation of the Sumoto Effect", Journal of Applied physics, Vol. 32, No10, (1961),1888-1893.
- (4) William F.Pickard, "Ion Drag Pumping.", J. of Applied Physics, Vol.34, No.2, (1963),246-258.