研究論文

EHD現象を応用した揺動運動型アクチュエータの開発*

寺 阪 澄 孝**, 三 井 和 幸**

Development of a Swing Motion Type Actuator using EHD Phenomenon

Sumitaka TERASAKA, Kazuyuki MITSUI

An actuator which has softness is necessary for small equipment used in environments that coexists with people such as welfare equipment and a power assistance device. A peripheral equipment such as a compressor is needed though an existing device that uses air pressure and oil pressure has flexibility. In addition, enlargement and the noise of the system are feared. Moreover, when an electromagnetic motor is used and controlled, there is a problem in that control is complex though the system is small. In this study, a new actuator that is capable of soft motion was developed by applying the EHD phenomenon. When the EHD phenomenon is applied to the actuator, an actuator with simple structure and a small system can be produced. In this study, firstly, a pump using the EHD phenomenon was produced. Next, an actuator which converts pressure into swing motion was produced. Also, the characteristics of an actuator that used the EHD phenomenon by the driving speed and the output torque was evaluated.

Key words : EHD, Electrode, High Voltage, Actuator, Pump

1. 緒 言

近年、医療や福祉などの人間と共存する環境での使用を目的とした小型機器やロボットの研究が精力的に行われている。これらの機器に使用するアクチュエータには、人と直接接する環境において用いられることを考慮し、柔らかい動きが可能なアクチュエータであることが必要とされている。そして、このような観点から空気圧や油圧などの流体の力で駆動するアクチュエータが精力的に開発され、パワーアシストスーツなどへの応用は実用化の段階まで来ている^{1),2)}。しかし、それらを駆動するためのコンプレッサやポンプ等の周辺機器を含めるとシステムが大型化してしまうことのみならず、そこから発生する騒音や振動などの解決すべき課題も多い。

そこで本研究ではこれらの問題を解決する新たな駆動源として電気エネルギーにより直接流体に流れを発生させるEHD現象に着目した。このEHD現象を流体の駆動装置として応用した場合、流体の力で駆動する柔らかい動きが可能なアクチュエータとしてだけでなく、電極のみで流動を発生させるため、流体を作動させる機構に機械可動部を必要とせず、そのため小型で騒音の無い駆動装置の開発が可能であると考えられる。

本研究ではEHD現象を応用することで、アクチュエータの

不要なポンプを開発し、さらに流体駆動源を内蔵した揺動運動が可能なアクチュエータを製作しその評価をおこなった。

2. EHD現象

EHD (Electrohydrodynamics) 現象とは、シリコンオイル、機械油など、電気絶縁性流体に電極を挿入し、電極間に高電圧を印加することにより、電極間で拡散、攪拌などの流体運動が発生する現象である^{3),4)}。

EHD現象は1960年代に数元ら⁵⁾により発見され、その後EHD現象を応用したアクチュエータの開発が精力的に行われたが、発生する圧力が低いなどの理由により実用化には至らなかった。しかし、近年の研究によりECF（電界共役流体）など、EHD現象とそれに類似した電氣流動現象も含め強い流動を発生する流体の発見により、さまざまなアクチュエータへの応用とその実用化が進められている^{6),7)}。

本研究では、これまでの研究により我々が調整したフッ素系の絶縁性流体を用い、Fig. 1に示すような板状の電極の上

Fig. 1 Electrode composition which generates EHD phenomenon

*平成21年12月10日

**東京電機大学工学部機械工学科

(所在地：東京都千代田区神田錦町2-2)

(E-mail: terasaka@mail.dendaia.ac.jp)

に傾斜させた電極を配置した電極構造において、電極間に分布する電界により流体に指向性を有する流れが発生することを確認している⁸⁾。

3. EHDポンプ

板状電極と傾斜させた電極の電極構造により発生する、一方向へ流れるEHD現象を利用し、連続的に液体を圧送するEHDポンプを試作した。

3.1 EHDポンプの基本構造

EHDポンプはFig. 2に示すように装置中央に電極を配置し、装置内部および配管を本実験で用いたフッ素系の絶縁性液体で満たし、直流電圧の印加により図の左手前から右奥へ流動が発生し両端にある入出口により流体を循環させる構造とした。なお、傾斜させた電極は板状電極に対し 30° の位置に1対配置させる構造とした⁸⁾。電極のサイズは電極高さ $h=10\text{mm}$ 、傾斜させた電極の長さ $l=10\text{mm}$ とし、傾斜させた電極と板状電極との間隔が最も狭くなる箇所の電極間隔は $d=1\text{mm}$ に設定

Fig. 2 The prototype of EHD pump and the structure of electrodes

Fig. 3 Schematic of pressure and flow rate measurement system

Fig. 4 Characteristics of pressure and flow rate

した。以上の電極構造・サイズの電極をアクリル製のハウジングに収める構造とした。

3.2 EHDポンプの基礎特性

試作したEHDポンプの基礎特性を測るため、印加電圧とEHDポンプの出口から吐出される圧力及び流量の関係をFig. 3に示す装置を用い測定した。流量計測には超音波流量計を用いバルブを開放した状態で実験を行い無負荷の流量を測定した。また、圧力計測にはダイヤフラム式圧力計を用い、バルブを全閉とすることで管路内の流れを止め静圧（全圧）を測定した。なお、EHDポンプへの電圧印加には直流高電圧電源を用い1 kV間隔で電圧を印加した。

試作したEHDポンプの印加電圧に対する圧力及び流量の特性をFig. 4に示す。印加電圧の上昇にともない圧力は2次曲線状に、また流量は線形に上昇する傾向を示した。なお、最大の印加電圧である10kVでは圧力3.1kPa、最大流量8.6ml/sを得た。

3.3 電極サイズの変更に伴うEHDポンプの特性

EHD現象により発生する流れの強さは電極の形状に影響されるため、電極部のサイズの変化に伴う圧力・流量特性の変化を検討するために、電極の高さと傾斜させた電極の長さを変化させる検討を行った。

3.3.1 電極の高さがEHDポンプの特性に与える影響

電極高さを変更した影響のみが測定結果に反映されるように、傾斜させた電極の長さ l の値を10mmに固定とし、電極の高さ h の値のみを10・5・2・1 mmと変化させることとし、EHDポンプをそれぞれ製作した。

3章2節の装置および方法を用い測定したEHDポンプの圧力・流量の測定結果をFig. 5に示す。値はすべて10kV印加時におけるもので、流量が電極の高さを低くすることにより減少する傾向にあるのは、電極の高さにより流体が流れる流路の断面積が小さくなるためであると考えられる。一方、圧力は電極の高さの変化に関わらずほぼ一定の値を示すことから電極の面積には依存しないことがわかる。このことから、電極の高さを低くすることにより圧力を低下させることなく電極を小さくすることができ、また必要とする流量に合わせて

Fig. 5 Characteristics of pressure and flow rate in the electrode height

Fig. 6 Characteristics of pressure and flow rate in the plate electrode length

電極高さを設定できるため、装置の小型化も可能であることが考えられる。

3.3.2 傾斜させた電極の長さが動作特性に与える影響

傾斜させた電極の長さの変更においては電極の高さ h の値を5mmに固定し、傾斜させた電極の長さ l のみ10・5・2・1mmと変化させ、電極の長さのみの影響を測定した。傾斜させた電極の長さを変化させたEHDポンプをそれぞれ製作し、3章2節の測定装置および方法を用い圧力・流量の特性を測定した。Fig. 6に示す測定結果より、傾斜させた電極の長さを短くしても圧力・流量ともに変化が見られない傾向が得られた。電極の長さを変化させても流路の断面積は変化しないことから流量の変化はなく、また電極の高さの結果からも、圧力が電極の面積に影響しないことから、より強いEHD現象を発生させる電極構造は電極の面積よりも、むしろ電界分布などに影響する電極の形状や電極の配置に大きく依存することが考えられる。そして、電極の形状・配置により性能が変化することから、EHDポンプに用いる電極構造は小型に構成することが可能であり、高圧力の発生のためにはより小さい電極を複数段配置する方法が有効であると考えられる。

4. 駆動源を内蔵した流体アクチュエータの開発

EHDポンプの電極サイズを変化させることによって、電極

サイズの小型化や流量特性を操作することが可能であることがわかった。先の実験より得られた結果を基に製作したEHDポンプをアクチュエータの構造体内に内蔵した流体駆動システムを開発し、EHD現象を応用した流体アクチュエータの評価をおこなった。

4.1 揺動運動型アクチュエータ

開発する駆動装置をロボットアーム等の関節などへ応用することを想定し、試作したアクチュエータは揺動運動を行なえる構造を採用した。アクチュエータの構造及び外形サイズをFig. 7に示す。主にアッパーデッキ、ロアデッキ、ブリッジ、ベローズにより構成し、アッパーおよびロア（縦60mm、横135mm厚さ11mm）の二つのデッキをブリッジ（高さ110mm）により拘束し最大で $\pm 30^\circ$ の回転動作をおこなう構造とし、デッキ間の両端のベローズ（外径35mm内径23mm）を伸縮させることによりデッキは揺動運動をおこなう仕組みとした。

揺動アクチュエータの回転角度はデッキが水平の状態を中立位置とし $\pm 30^\circ$ に傾斜することが可能である。本アクチュエータはFig. 8に示すように、ベローズの伸縮をロアデッキ

Fig. 7 The structure of the swing motion type actuator

Fig. 8 Actuation mechanism

に内蔵したEHDポンプによりベローズ内に満たされた絶縁性流体を移動させることによりデッキを回転させることにより揺動運動をおこなう。ベローズの材質は低い圧力から動作伸縮可能とするためNBRを選定し、そのほかの主要な構成部品はアクリルを使用した。この揺動アクチュエータは駆動源となるEHDポンプをロアデッキ内部に搭載することでポンプからアクチュエータまでの配管を不要とし、流体駆動をおこないつながりながらもアクチュエータ本体がシンプルとなる構造を実現した。

4.2 高圧力EHDポンプ（ロアデッキ）

揺動アクチュエータの発生トルクを、本体ベローズの弾性やアッパーデッキの重量による損失を考慮し $1\text{ N}\cdot\text{m}$ に設定し駆動源となるEHDポンプの設計を行なった。そして、この仕様を満たす動作特性としてFig. 9に示す100kPa前後の圧力を出力可能なEHDポンプを製作した。このポンプはFig. 10に示すように、高圧力を実現するため電極部を複数段直列に結合

Fig. 9 Structure of the high pressure EHD pump

Fig. 10 Structure of the high pressure EHD pump

Fig. 11 Electrode structure which changes the direction of the flow

することにより、高い圧力に昇圧し出力することが可能であると考え、ロアデッキの内部に局所で折り曲げた長い流路を形成し電極を直列に配置する構造とした。電極の個数は3章Fig. 4のEHDポンプの基礎特性に示したように1個の電極部が3 kPa程度の圧力を出力可能であることから、直列個数分昇圧できるものと考え、印加電圧10kVにおいて100kPa前後の出力を実現可能であると考えられる35個を直列に配置することとした。また、EHDポンプを構成する電極のサイズは3章の電極サイズの変更において検討した結果において、いずれの電極高さにおいても圧力に変化は見られなかったことから、流路の断面積を大きくとることが可能で比較的高流量を得やすい高さ5 mmとし、電極の長さにおいても圧力の変化はなく、電極長さ1 mmが最も小型に電極を製作することが可能であるものの、加工精度の影響を少なくするために長さ5 mmに留めた。さらに、EHD現象は不平等電界に依存して発生し、印加する電圧の極性を入れ替えてもEHD現象による流動の方向は変化しないことから、揺動運動を実現するためにFig. 11に示すように、傾斜させた電極を流れの方向に対し対照的に配置した。そして、傾斜させた電極へ印加する電圧の極性を切り替えることにより、流動を双方向に発生させることが可能な電極構造とした。

Fig. 12 Characteristic of pressure and applied voltage

Fig. 13 Characteristic of pressure and flow rate

4.3 アクチュエータ駆動源の性能

アクチュエータの駆動源である高圧力EHDポンプの性能を3章2節の測定装置を用い測定した。Fig. 12に示す印加電圧に対する圧力の特性から、圧力は印加電圧の上昇とともに増加し、10kV印加時には設計値を満たすおよそ100kPaに達した。また、圧力・流量特性はFig. 13に示すように線形になり、印加電圧に対し圧力、流量共に比例的に上昇する傾向を示した。

4.4 揺動アクチュエータの評価装置

試作した揺動アクチュエータの性能を評価するため、静特性及び動特性を測定した。測定装置をFig. 14に示す。トルクはロードセルを用い、回転角度をポテンションメータによりA/Dコンバータを介しコンピュータにより計測した。

4.5 揺動アクチュエータの静特性

4.5.1 発生トルク

揺動アクチュエータの印加電圧に対する発生トルクをFig. 15に示す。発生トルクはロードセルにより得られた値とFig. 14のLに示す腕の長さを掛けトルクに換算した。

Fig. 15 Characteristic of the torque and the applied voltage

Fig. 16 Characteristic of the angle and the applied voltage

揺動アクチュエータが内蔵しているEHDポンプの圧力が高いため、印加電圧1kVからEHDポンプの駆動と共に揺動アクチュエータはトルクを出力し始め、入力電圧を高めるのにもともないその値も上昇した。印加電圧6kVを超えると目標としていた1N·mに達成し、さらに印加電圧8kVにおいては1.5N·mの値を得ることが可能であった。電圧印加によるトルクの発生傾向から、電圧により発生トルクが制御可能であると考えられる。

4.5.2 回転角度

Fig. 14におけるロードセルを取り外し、揺動アクチュエータの角度が自由になる状態で、電圧を入力した際の静定した角度をFig. 16に示す。入力電圧と静定角度には比例傾向がみられ、4.5kVで最大可動域30°に達した。このことから、無負荷の回転状態においては電圧により角度をコントロールできる特性を有しているといえる。

4.6 揺動アクチュエータの動特性

揺動アクチュエータに時刻0sにおいて6～10kVの電圧をステップ入力した際の回転角度の推移をFig. 17に示す。このときFig. 14におけるロードセルを取り外し、回転角度の検討と同様に揺動アクチュエータの角度が自由になる状態で測定した。入力電圧の上昇に伴い角速度は上昇する傾向を示し、10kV入力時には平均0.15rad/s (8.5°/s)の値を得た。なお、駆動源となるEHDポンプの電極高さを大きくし流量特性

Fig. 14 The performance measurement system

Fig. 17 Step response of angle (No load)

Fig. 18 Step response of angle (Load)

を向上させることで、より高速な駆動に対応できると考えられる。また、最大可動域 30° に至るまで、印加電圧に比例して圧力が発生し、EHDポンプの動作特性が揺動運動にも反映されており、脈流や振動が見られず継ぎ目の無い動作を実現している。

4.7 負荷特性

Fig. 14の測定装置のロードセルの代わりに、錘を下げることでよりアクチュエータに回転負荷を与えた場合の特性をFig. 18に示す。入力電圧は 8 kV で錘の重さにより $0\sim 0.8\text{ N}\cdot\text{m}$ の負荷を与えた。負荷の大きさに比例し、ベローズの直径方向に伸長したのち軸方向の動作が始まるため 0 s からの動作遅れが生じているものの、負荷が加わっても揺動アクチュエータは無負荷の実験と同様に継ぎ目の無い動作が可能であることがわかった。

5. 結 言

本研究では、絶縁性流体に高電圧を印加することにより、電氣的エネルギーを流体の流れに変換するEHD現象に着目し、EHD現象を応用することで、電磁モータ等のアクチュエータの不要なポンプを開発した。さらに、EHDポンプを応用することで、流体駆動源を内蔵した揺動運動が可能なアクチュエータを製作した。

EHD現象を応用したアクチュエータは出力が微少であるが

ゆえ小型機器への適用が多く検討され、一般的な駆動機器への発展は難しいとされてきた。これに対し、本研究ではEHD現象による強い指向性を有する流動を得ることが可能な、板状電極の上に傾斜させた電極を配置した電極構造を用い高出力のEHDポンプを開発した。さらに、電極サイズを変化させる検討と電極構造の直列化の検討において、EHDポンプの発生する圧力を向上させ最大 100 kPa を得ることに成功した。そして、開発したEHDポンプをアクチュエータの構造・形状に合わせ内部に搭載する流体駆動システムを提案し、揺動運動型アクチュエータを製作した。その結果、EHD現象を用いる利点である静寂性・振動が無いという特徴に加え、流体駆動による柔らかさを有した動作が可能で、最大 $1.5\text{ N}\cdot\text{m}$ のアクチュエーションが可能であった。

以上より、本研究で開発した揺動運動型アクチュエータは、コンプレッサ等を利用しない新たな形態の流体駆動アクチュエータであるといえ、人間と共存する環境での使用を目的としたパワーアシストデバイスなどへの応用の可能性を見出すことができたと考えられる。

謝 辞

本研究の一部は、東京電機大学総合研究所研究、ならびに東京電機大学学術振興基金の援助により行ったものである。ここに謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 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, p. 805-808 (2002)
- 2) 山本圭治郎：ウェアラブル・パワーアシストスーツ，日本フルードパワーシステム学会誌，Vol. 34, No. 5, p. 140-144 (2003)
- 3) 静電気学会編：静電気ハンドブック，株式会社オーム社，p. 915-916, p. 928-931 (1998)
- 4) 竹山説三：電磁気学現象論，丸善，p. 123 (1972)
- 5) 数元伊之助：液状誘電体が電極を上昇する現象，応用物理，Vol. 25, No. 6, p. 204-205 (1956)
- 6) 横田真一，阿部竜太郎，竹村研次郎，枝村一弥：ECFジェット駆動マイクロフィンガの提案とラージモデルの特性評価，日本フルードパワーシステム学会論文集，Vol. 38, No. 5, p. 65-70 (2007)
- 7) 阿部竜太郎，横田真一，竹村研次郎，枝村一弥：ECFジェットによる発生圧力を応用したチューブ形ECFマイクロアクチュエータ，日本フルードパワーシステム学会論文集，Vol. 37, No. 5, p. 55-60 (2006)
- 8) 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，Vol. 74, No. 1, p. 87-91 (2008)