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 —

寺 阪 澄 孝* 工 藤 周** 三 井 和 幸*

Development of the Rotation Type Actuator using EHD Phenomenon
- Development of the EHD Motor -

Sumitaka TERASAKA, Shu KUDOU, Kazuyuki MITSUI

The purpose of this study was development of the rotation type actuator that applied the EHD phenomenon. The EHD is a phenomenon that generates the flow in the insulating fluid by applying a high voltage electric field. In this study, firstly, the electrode arrangement which makes the strong EHD phenomenon was investigated and the EHD motor applying that electrode arrangement was developed. In the next step, the EHD motor using the developed electrode arrangement was manufactured as an experiment. Then, the electrode arrangement of the EHD motor was changed, and the performance change of the EHD motor was examined.

Key words: EHD, electrohydrodynamics, motor, actuator, electrode

1. 緒 言

EHDとはElectrohydrodynamics(電気流体力学)の略称で、絶縁性流体に直流電圧を印加すると電極間に流れが発生する現象をEHD現象と呼ぶ。この現象は1950年代に数元¹⁾により発見されていたが、従来EHD現象に関する研究にはシリコンオイルや機械油等の流体が用いられ、これらの流体は発生する圧力が数100Paと弱いものであった。また、電圧印加のための電極配置の研究も十分には行われておらず低い圧力しか得られなかった。そのため、EHD現象は応用が期待されていたにもかかわらずアクチュエータなどへの応用には至らなかった。しかし、近年DBDN(ドデカン2酸-n-ブチル)等の強い流れを発生する流体が見出され、現在ではEHDに関する多くの研究が行われている^{2)~4)}。特にEHD現象に類似した研究として横田らのグループでは、ECF(Electro Conjugate Fluid)と呼ばれるジェット流を発生する特殊な液体を用い、様々なアクチュエータの開発に成功し機能性流体を応用したアクチュエータ開発の先駆けとなり、その応用が期待されている^{5)~8)}。

EHD現象をアクチュエータへ応用した場合、電圧印加により直接流体を駆動させるため機構部品をほとんど含まず、また部品点数が少なく信頼性が高い。さらに、流体駆動であるため流体の圧縮等により機器自体が柔らかさを有するため、直接人間に接する機器など柔軟性を有するアクチュエータへの応用が期待できる。

既に、空気圧等を利用した流体駆動型において、柔軟性を有するアクチュエータの開発が実施されているが、コンプレッサや配管等が必要となりシステムが大型化することが懸念される。また、電磁モータ等を用い制御により柔軟性を得る方法では、システムが小型であるものの、制御が複雑でアクチュエータへの過負荷の回避など技術的な問題も多い。EHD現象をアクチュエータへ利用できれば、電磁モータの有するシステムが小型

であるという利点と、流体駆動型による機構的な柔軟性を有するという利点を併せもつ、新たなアクチュエータが実現できると考えられる。

本研究では、工業的に多く用いられ、その応用範囲も広いと考えられる回転型のアクチュエータに着目した。まず、EHD現象を利用したアクチュエータの開発が可能であるか検討するために、EHD現象を発生する基本的な電極構造を改良した。さらにアクチュエータに適した新たな電極構造を考案し、EHDモータと呼ぶ回転型アクチュエータの開発を行った。また、これらの開発したアクチュエータについて基礎的な特性と電極形状による性能の変化を実験的に検討した。

2. 電極構造の考案

EHD現象は不平等電界中において強い流動を発生するとされている⁹⁾ため、密から疎、または疎から密になるような不平等電界を形成する電極配置として、図1(a)に示す平板電極と線電極の電極配置に着目した。この電極配置において線電極をプラス、平板電極を

(a) Schematic diagram of electrode configuration

(b) Photograph of EHD phenomenon in silicone oil

(c) Photograph of the fluorine-containing insulation fluid rising up the line electrode

Fig.1 EHD phenomenon by plate electrode and line electrode

* 原稿受付 平成19年2月26日

* 正会員 東京電機大学 (東京都千代田区神田錦町2-2)

** 東京電機大学大学院 先端科学技術研究科

GND としこれらを絶縁性液中に配置し直流高電圧を印加すると、印加電圧 10kV で、絶縁性液体としてシリコンオイルを用いた条件において、図 1 (b) のように平板電極から線電極へ向けて活発な流体の上昇が確認された。流体が上昇した高さは、印加電圧 10kV 時において最大で約 10 mm であった。さらに、我々が調整したフッ素系の絶縁液体を用い同条件にて実験を行った結果、図 1 (c) に示すように液面上昇は 40mm に達した。この流動を一方方向へ流すことにより力を取り出すことが可能であれば、EHD 現象を応用することによる利点である、機械要素が少なく、また柔軟性に富んだアクチュエータの開発が可能であると考えた。そして、これらを踏まえ、本研究において開発するアクチュエータを、工業的に広く応用され、また検討が行いやすいことから、回転型のアクチュエータとした。そして線電極と平板電極の電極形状を、回転体の駆動に適する電極形状へ変化させるため、以下に示すような形状変更を考案した。

図 2(a) は図 1 の液面上昇を発生する電極構造の模式図で、絶縁性液体中に配置した線電極と平板電極の電極対において、EHD 現象による流動は平板電極から線電極に沿うように上方向へ発生する。これを図 2(b) のように 90 度回転させると、その流動も横方向に発生する。次に、図 2(c) のように線電極を平板電極の下側に移動させると流動も線電極と共に移動する。さらに、線電極を延長すると流れは線電極の両側を沿うように発生する(図 2(d))。そして、平板電極を斜めに傾けることにより、平板電極から発生する流れは一方方向に生じ、図の矢印に示す方向に平板電極は流れの反作用を受ける(図 2(e))。ここで、均等に流れが発生するように、線電極の形状を平面にする(図 2(f))。さらに、平面にした電極を環状に変形することにより、図 2(g)

Fig.2 Design of electrode shape

に示す回転運動を得ることが可能となり、斜めに傾けた平板電極に出力軸を取り付け、EHD 現象を回転運動として取り出す回転型アクチュエータの製作が可能であると考えた。

3. 開発した回転型アクチュエータ

考案した電極形状を用いて EHD 回転型アクチュエータの製作を行った。図 3(a) に示すように、アルミニウム板により製作した環状電極をアクリル樹脂により製作した底部に貼り付け、絶縁性液体を入れるための容器となる筒を、内部の動作が観察しやすいようにアクリル樹脂で製作しその上部に取り付けた。ふた部にはベアリングを軸受けとして取り付け、ステンレス製の出力軸を取り付けたアルミニウム製の平板電極を配置した。各寸法は容器部分の内径 60mm、高さ 40mm、ふた、底部はそれぞれ縦・横各 100mm、高さ 20mm、出力軸の直径 3mm とした。また、環状電極にはプラス電圧を印加し、平板電極は GND とし、回転する平板電極へベアリングから出力軸を通し接地する構造とした。図 3(b) は製作したアクチュエータの外観である。このように、我々が考案した電極構造を用い、新たに開発したアクチュエータを EHD モータと呼ぶこととした。

4. 電極形状の違いによる性能評価実験

EHD 現象は電界分布に強く依存している⁹⁾ ことから、電極配置が EHD モータの性能にも反映されると考えられる。また、EHD モータ内部の平板電極はロータとして絶縁性液体を掻き分けて回転運動を行うため流体力学的な抵抗を受ける。そして、これら電界と流体の影響は相互に EHD モータの性能へ影響を及ぼすと考えられる。そのため、EHD 現象により発生する流れをより効率的に取り出すことが可能で、かつ流体力学的に回

(a) Structure of the actuator

(b) Photograph of the actuator

Fig.3 Developed the actuator which named the EHD motor

転運動を妨げにくい電極形状を解析的に検討することは困難であると考えた。そこで電界の影響と流体から受ける流れの影響が最も表れると考えられる電極形状の中で図 4 に示した、平板電極角度、平板電極長さ、環状電極幅の 3 種にパラメータを限定し、これらを変化させたときの無負荷回転数と始動トルクを測定することにより、EHD モータの性能の違いを検討した。

4.1 実験方法

4.1.1 無負荷回転数の測定

使用した実験装置を図 5 に示す。EHD モータには直流電源（松定プレジジョン製 PL-18-2、出力電圧 0~18V）から昇圧器（松定プレジジョン製 HV-10P、最大出力電圧 10kV）を介し電圧を印加した。そして、無負荷回転数の測定には、光学式回転計（横河電気製ポケット回転計）と EHD モータの出力軸に取り付けた反射板を用い、非接触により出力される回転数を A/D 変換（共和電業社製、PCD-320A）した後コンピュータに記録した。

4.1.2 始動トルクの測定

始動トルクの測定装置は図 6 に示すように、ロードセル（共和電業社製、LVS-200GA、定格 200gf）、ロードセル用アンプ（共和電業社製、PCD-300A）、コンピュータ、直流電源、昇圧器より構成した。

EHD モータの出力軸に伸縮の無い糸を巻き付け、ロードセルにより測定したモータの出力軸が糸を巻きつける力をコンピュータに記録した。その記録した値と、出力軸の半径から始動トルクを算出した。なお、無負荷回転数の測定と同様に電圧を印加することにより EHD モータを駆動した。

4.2 実験条件

図 7 に示すように、3 種類のパラメータは、平板電極角度は 15、30、45、60° の 4 種類、平板電極長さは 5、7、10mm の 3 種類、環状電極幅は 5、10、20mm の 3 種類とし、これらは

Fig.4 Parameter of electrode shape

Fig.5 Measurement device of no load rotational speed

Fig.6 Measurement device of starting torque

相互に影響し合うと考えられることから、全ての組合せである 36 通りで測定を行った。また、印加電圧は使用した装置の最大出力電圧から 1kV 間隔で 10kV までとした。なお、絶縁性の液体は EHD モータ内部に完全に満たし、最も電極間距離が小さい環状電極表面と平板電極先端との距離を 2mm とした。なお、平板電極の幅については回転半径が変化してしまうためパラメータとせず 20mm に固定して実験を行った。

4.3 結果

図 8 に平板電極角度 4 種類、平板電極長さ 3 種類、環状電極幅 3 種類のパラメータの全ての組合せである 36 通りの条件における、印加電圧と無負荷回転数の関係を示す。また図 9 に印加電圧と始動トルクの関係を示す。なお、二つのグラフとも最大の値を示した組合せの結果を黒で、その他の組合せによる結果を灰色で示した。

図 8 に示すように、全てのパラメータの組合せにおいて無負荷回転数の測定を行った結果、印加電圧 2 から 6kV において全ての条件で EHD モータの動作が開始し、印加電圧を上昇させるに伴い無負荷回転数も比例的に上昇する傾向が表れた。最も高い無負荷回転数を示した電極の組合せは(図中の黒で示した)平板電極角度 30°、平板電極長さ 7mm、環状電極幅 20mm で、最大回転数は 314rpm であった。また、この時の電流値は

Fig.7 Measurement condition of the EHD motor

Fig.8 Relation between applied voltage and no load rotational speed

Fig.9 Relation between applied voltage and initial torque

20 μ A で消費電力は 0.2W となった。

図 9 に示すように、始動トルクにおいては、印加電圧 2kV から 4kV において全ての条件で EHD モータの動作が開始しトルクを発生した。印加電圧を上昇させるに伴い始動トルクは二次曲線的に上昇する傾向が表れた。そして、最も高い始動トルクを示した電極の組合せは(図中の黒で示した)平板電極角度 30°, 平板電極長さ 7mm, 環状電極幅 20mm で最大トルク 435 μ Nm であった。また、この時の電流値は 26 μ A で消費電力は 0.26W となった。

5. 考 察

4 章 3 節において、電圧により EHD モータの回転数、トルクの調節が可能であることを確認できた。また、いずれの実験においても電流値は約 20 μ A 程度であったことから、EHD モータに掛かる負荷が最大である始動トルク測定の状態であっても、無負荷の消費電力と比較して殆ど変化はないと考えられる。このことから、EHD モータは動作中の過負荷により出力軸が止まっても、一般的な電磁モータのように過電流が流れず、また過電流に対する制御を行う必要が無いと、負荷に対する柔軟性を有していると考えられる。

次に、最も高い性能を示した平板電極角度 30°, 平板電極長さ 7mm, 環状電極の幅 20mm の組合せを基準として、このパラメータの前後でどのように始動トルクと無負荷回転数に変化が現れたのか検討を行うために、横軸に変更したパラメータをとり、縦軸に回転数、トルクをとったグラフを新たに作成した。

5.1 平板電極角度と無負荷回転数・始動トルクの関係

図 10 に平板電極の角度と無負荷回転数、及び始動トルクの関係を示す。なお、このグラフでは平板電極の角度の影響のみを見るため、平板電極長さ 7mm, 環状電極幅 20mm は固定としている。また、0~10kV までのグラフは同様の傾向を示したので、安定した動作が可能であった最も低い印加電圧 4kV と最大印加電圧 10kV とその中間電圧 7kV のみのグラフを示す。

平板電極角度の変化に対する性能の違いを見ると、4, 7, 10kV のいずれの電圧においても平板電極の角度 30° を最大値とし、無負荷回転数、始動トルク共に凸形の傾向が得られた。これは、平板電極角度が電極間に出来る電界の形状に影響を及ぼしているためであると考えられる。そこで、有限要素法 (ANSYS, INC 社製, ANSYS) による電界解析を行った(図 11)。モデルは平板電極と環状電極を EHD モータの側面から見た 2 次元形状を模式的に現したもので、平板電極が環状電極と平行な 0°, 最大値を示した 30° の 2 種類である。その他の形状は実際の EHD モ

ータと同様にし、電極間隔は 2mm, 印加電圧は 10kV とした。図の色は電界強度を表し、薄い色は電界強度が強く、濃くなるに伴い電界強度は弱くなることを示している。

図 11(a) に示すように平行の電極配置において平板電極と環状電極間は均一な電界分布となり、図 11(b) のように角度が大きくなると、不平等な電界分布が電極間に形成され、平板電極先端が密となり、環状電極面が疎な電界が形成される。EHD 現象は不平等電界により、より強い流れが発生するため、角度が浅く均一な電界分布を形成し易い平行に近い電極配置では始動トルク・無負荷回転数ともに低下すると考えられる。

また、平板電極は液体中を移動するため流動抵抗が生じ、電極角度の増加に伴い無負荷回転数が減少したと考えられる。さらに、EHD モータは平板電極から流れを発生させ反作用で回転するがそれと同時に、絶縁性液体も力を受けているため流体は EHD モータの回転と逆方向に流れる。そして、発生した流れは円筒内を移動する過程で減速するものの平板電極を押し戻そうとする力として働いていると考えられる。そのため、平板電極角度が大きくなるのに伴い、電極を固定して測定する始動トルクであっても無負荷回転数と同様に流体の抵抗によりトルクが減少したと考えられる。そして、これらの相互作用により無負荷回転数、始動トルク共に平板電極角度 30° で値が最大になったと考えられる。なお、この実験で考案した平板電極による電極構造の解析には EHD 現象と流体力学的な影響を同時に考慮する必要がある、EHD 現象の発生メカニズムについては数式化されているものの、流体力学との複合解析は困難であるため、詳細な検討は今後の課題であると考えている。

5.2 平板電極長さとの無負荷回転数・始動トルクの関係

図 12 に平板電極長さとの無負荷回転数及び始動トルクとの関係を示す。なお、平板電極長さの影響のみを見るため、平板電極角度 30°, 環状電極幅 20mm は固定とした。また、5 章 1 節と同様に印加電圧 4, 7, 10kV のグラフを示す。

平板電極長さの変化に対する性能の違いを見ると、いずれの電圧においても平板電極の長さ 7mm を最大にして無負荷回転

Fig.11 Analytical result of electric field distribution by finite element method

Fig.10 Relation between angle of plate electrode and rotational speed and relations between angle of plate electrode and torque

Fig.12 Relation between length of plate electrode and rotational speed and relations between length of plate electrode and torque

数, 始動トルク共にグラフの形状は凸になった。

この理由として, 図 13(a) に示すように平板電極が極端に短くほぼ点に近い状態では, 発生する流れは左右対称になり, 回転方向が定まらず回転方向を打ち消すように流れるため, 無負荷回転数, 始動トルク共に小さくなると考えられる。これに対し, 図 13(b) に示すように, ある程度の長さをもたせた平板電極においては, 電極を沿うように一方向に流れが発生するため, 平板電極には整流作用があると考えられる。また, 平板電極の角度と同様に平板電極の長さに関しても長すぎる場合, 平板電極を押し戻す流れが大きな抵抗となり性能が低下すると考えられる。このことから, 平板電極にはある程度の長さが必要であり, 今回の条件においては 7mm が最大であったと考えられる。

5.3 環状電極幅と無負荷回転数・始動トルクの関係

図 14 に環状電極幅と無負荷回転数及び始動トルクとの関係を示す。なお, 環状電極幅の影響のみを見るため, 平板電極角度 30° , 平板電極長さ 7mm は固定とした。また, 5 章 1 節と同様に印加電圧 4, 7, 10kV のグラフを示す。

グラフは右上がりとなり, 環状電極幅 20mm において無負荷回転数, 始動トルクともに最大となった。環状電極幅が, 平板電極の底辺と同じ幅のときは(図 15(a)), 電界が均一なため流れが一方向に発生し回転が起こると考えられる。これに対し, 環状電極の幅が狭いと(図 15(b)), 平板電極の中央では図 15(a)と同様に流れが発生するが, 平板電極の両端は電極間隔が広いので電界が弱く, 流れも図 15(a)に比べ弱くなってしまい, 回転が起こり難くなる。そのため, 環状電極幅 20mm のとき最大値を示したと考えられる。

Fig.13 Comparison of flow by length of plate electrode

Fig.14 Relation between length of plate electrode and rotational speed and relations between length of plate electrode and torque

Fig.15 Performance change by toroidal electrode

6. EHDモータの評価

本研究では一般的にEHD現象を発生する電極構造である線電極と平板電極を改良することで 3 章に示すように新たに平板電極と環状電極による電極構造を考案した。

この電極は不平等電界を用いることでEHD現象を発生させる構造であるため, 流れの方向に極性をもたず, 単純な電界印加のみでは対流のみが発生し流れを取り出すことが困難であるような流体においても駆動が可能であると考えられる。そのため, 工業的に入手し易いシリコンオイル等を用いることにより, 安価にアクチュエータの製作が可能であると考えられる。

さらに, 図 3 に示したように, 電極は回転動作を行う平板電極と容器本体に固定されている環状電極に分離されている構造であることから, 電極への配線を簡素にすることが可能である。また, 例えば平板電極を複数個配置するなど, ロータ側の電極形状のみを増やすことで高出力化を行うことも可能であり, 今回開発した電極構造は自由度の高い設計が可能であると考えられる。

7. 結 言

線電極と平板電極による電極構造を変形し, 傾けた平板電極と環状電極構造とすることで, EHD現象による流動から力を取り出し回転運動を発生する電極構造を考案した。さらに, この電極構造を応用してEHDモータの製作を行った。これにより, 以下に示す結果を得た。

- (1) EHDモータは電圧で無負荷回転数, 始動トルクの調整が可能である。
- (2) 負荷により出力軸が停止することがあっても電磁モータのような過電流の発生が少ない。
- (3) 今回の実験においては平板電極角度 30° , 平板電極長さ 7mm, 環状電極幅 20mm において最も高い性能を得た。

また, EHDモータは試作段階であるため, 今後の課題として, 流体の液漏れ対策や電極間隔を狭めることによる, 低印加電圧での駆動等の技術的問題の改善, さらに, 高出力化を目的とする平板電極数の増加等の電極配置の検討, 及び解析を行う予定である。

謝 辞

本論文を執筆するに当たり, 流体の提供と助言を頂いた群馬大学大学院黒田真一准教授に感謝致します。なお, 本研究の一部は東京電機大学総合研究所助成の下で行った。

参 考 文 献

- 1) 数元伊之助: 液状誘電体が電極を上昇する現象, 応用物理, **25**, 6(1956)264.
- 2) 赤木徹也, 堂田周次郎, 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, **68**, 673(2002)2614.
- 3) 花岡良一, 中道裕之, 高田新三, 深見正: EHDポンプと円錐ノズルによる液体ジェットの特徴的な流動特性, 電学論 A, **124**, 5(2004).
- 4) 服部正行, 関大和, 林郷裕一, 和泉健吉: ディスク型コロナモータの基礎的研究, 静電気学会講演論文集, (2002) 201.
- 5) 横田真一, 中田毅: ECFジェットを応用したマイクロアクチュエータ, フルードパワーシステム, **35**, 6(2004)368.
- 6) 横田真一, 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, **66**, 651(2000) 3799.
- 7) 竹村, 横田, 枝村: 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, **71**, 708(2005) 2571.
- 8) 横田, 除 他: 電界共役流体を利用した電子チップ液冷却用平面薄型ポンプ, 日本機械学会論文集, **71**, 709(2005) 2798.
- 9) 竹山説三: 電磁気学現象論, 丸善, (1972)123.