

## 論 文

## プラスチック薄板による EHD 流動の促進

江 渡 充 芳\*, 加 川 幸 雄\*\*

(2000年2月17日受付, 2000年9月5日受理)

## EHD Enhancement Due to the Presence of the Thin Plastic Plate

Mitsuyoshi ETO\* and Yukio KAGAWA\*\*

(Received February 17, 2000; Accepted September 5, 2000)

Electrohydrodynamic phenomenon generates the liquid circulation in insulating oils under the electric field application. This is due to the interaction between the electric field and the ions polarized in the oil. The ions are due to the presence of the dissolved moisture. A jet flow is observed when the one of the electrodes is partially covered with a thin plastic plate. This fact suggests that the charge injection from the electrode is accelerated with the presence of the plastic plate. An application of this effect is demonstrated for liquid pump based on the electrohydrodynamic flow. The structure of the developed pump is a plastic pipe with electrodes on the both sides. The needle electrode partially covered with a plastic film forms the anode and the ring electrode forms the cathode. Though the field of application of this pump is limited, as it is only workable in the insulating oil under high D.C. voltage, its structure is so simple that it is easily fabricated and the multiple configuration is straightforward to increase the power.

## 1. はじめに

絶縁油等の液体誘電体に金属電極を浸して直流高電圧を印加すると液体が流動する現象が見られる。これは EHD (Electrohydrodynamic) 流動と呼ばれており、金属電極から注入された空間電荷が液体分子に付着してイオンを形成し、静電力を受けてイオンドラッグを引き起こすためと考えられている。

絶縁油中における電界やイオンの分布についてはすでに報告した<sup>1-3)</sup>が、それらに伴う現象の一環として、絶縁油に平行平板アルミニウム電極を設け、直流高電圧を印加し

た場合に生じる液体のサーチュレーションについての実験と、シミュレーションを行ってきた<sup>4-6)</sup>。

その過程で電極の一部をプラスチックのフィルムや薄板で覆うと、強い流れが生じることを観測した<sup>7)</sup>。

この原因は現段階では解明されていないが、流動を観測した結果、金属電極表面を覆ったプラスチック板が電荷の注入を促進しているものと考えることができる。

この現象を利用すれば EHD 流動を簡単に制御することができる。また極めて簡単な構造の小型小電力の EHD ポンプを作り、プラスチックフィルムによってその効率を高めることができた。本報ではプラスチック薄板の電荷注入効果および EHD ポンプに対する影響について、その実験結果を述べる。

このポンプは、適当に湿分が溶け込んでいる絶縁油に直流高電圧を印加することから、用途は限定されたものとなるが、絶縁油入り変圧器や絶縁油入り蓄電器内の液体の循環、オイルヒーターの液体の循環、液体の汲み出し等への応用が期待される。また、このポンプは構造が簡単であり、出力を増すにはこれらを多数配置して直列作動させれば良い。

キーワード：電気流体力学、電荷注入、EHD ポンプ、絶縁油

\* 八戸短期大学経営情報学科

(031-0844 八戸市美保野 13-384)

Department of Management and Information,  
Hachinohe Junior College, 13-384, Mihono, Hachinohe,  
Aomori, 031-0844, Japan

\*\* 岡山大学工学部電気電子工学科

(700-0082 岡山市津島中 3-1-1)

Department of Electrical and Electronic Engineering,  
Faculty of Engineering, Okayama University, 3-1-1,  
Tsushima Naka, Okayama, Okayama, 700-0082, Japan

## 2. 平行平板における EHD 流動と制御

長方形の容器に平行平板アルミニウム電極を設け、これ

を絶縁性鉱油で充たし、 $1\sim3$  kV/cm の直流高電界を加えると、不規則な緩やかな EHD 流動が生じる。これは正負両極からの電荷注入密度がほぼ等しいため、互いに反対向きの流動を生じ、それに伴って電荷の移動および液体の流動が複雑に変化するためと考えられる。絶縁性鉱油としては共石2号絶縁油（粘性係数  $8.2\times10^{-3}$  Ns/m<sup>2</sup>、比誘電率 2.2）を用いた。十分に脱水、脱気した試料では流動が極めて緩慢となるので、ここでは適度に吸湿したもの（抵抗率  $1.5\times10^{10}$  Ω·cm 程度）を使用した。

電極の一部を厚さ 2 mm のプラスチック板（塩化ビニル：比誘電率 3.5）で覆うと図1～3のように強い流れ（ジェット流）が生じる。これらの図は容器の真上から観測したもので、重力は紙面から裏面に向かっている。

流れの方向の観測から、プラスチック板を正極側に挿入すると正電荷が注入され、負極側に挿入すると負電荷が注入されているものと考えることができる。図1～3の電極は長さ 18 cm のアルミニウム板で電極間隔は 6 cm である。流れを可視化するため絶縁性鉱油に微小な気泡を注入している。医療用の注射器（5 ml）を用い、針を付けずに絶縁性鉱油を 2 ml 程吸い込み、更に空気を 2 ml 程吸い込む。この先端を液面から 4 cm 程度の位置まで浸し、注射器中の液体を勢い良く注入すると、直径 0.1 mm 程度の気泡が多数発生する。この操作を 3~4 回繰り返した後、液体が静止するまで 30 秒程放置する。これに横方向から光を照射し、光束を調節して上方向から観測すると、液面から 2~3 cm の部分の流れを良く観測することができる。

しかし、ジェット流が気泡の注入に起因するものでないことは次のようにして確認した。先ず前述の容器に気泡のない絶縁性鉱油を充たし、流れの途中に厚さ 0.1 mm の塩化ビニルフィルム（比誘電率 3.5）で製作した小型軽量の「水車」を置く。これにプラスチック板を挿入して直流高電圧を印加すれば、肉眼で確認するのは困難ではあるが、その中心付近からジェット流が発生する。プラスチック板の位置を調節して、その流れが「水車」の端に当たるようにすれば「水車」は回転する。プラスチック板の位置と「水車」の回転の様子から、気泡を注入した場合と同様の流れが発生していることが確認された。（図4）

このように、プラスチック板を電極表面の任意の場所に挿入することによって、その部分からジェット流を発生させて EHD 流動を制御することが可能であり、絶縁油を含む電気機器内の液体の循環を制御することに応用できよう。厚さ 0.1 mm の塩化ビニルフィルム（比誘電率 3.5）や厚さ 1 mm のテフロン板（比誘電率 2.0）でも同様の効果があった。

### 3. プラスチックフィルムによる電荷注入の促進

平行平板電極の表面をプラスチック板で覆うことによつ

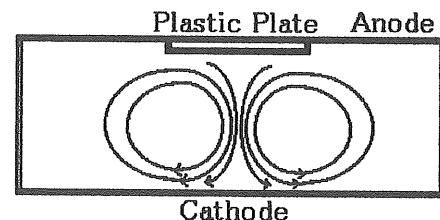
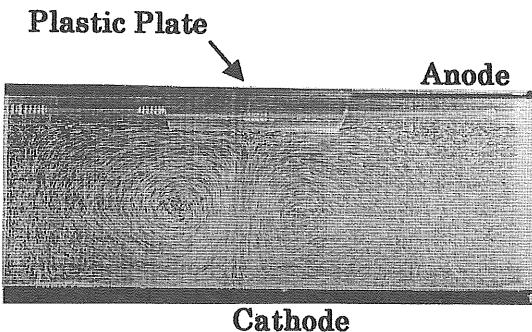
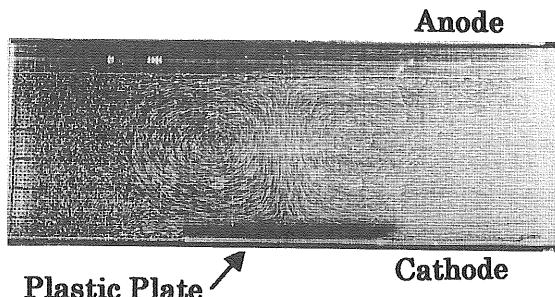


図1 プラスチック板を正極側に挿入した場合のジェット流（流れは正電極から負電極へ）とその概念図

Fig.1 Jet flow produced from anode to cathode by inserting a plastic plate over the anode and its schematic diagram.



Anode  
Plastic Plate  
Cathode

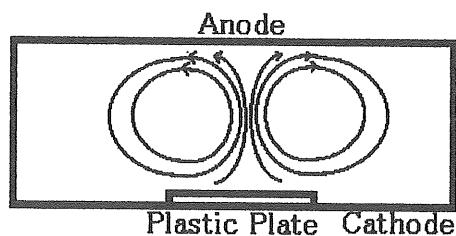


図2 プラスチック板を負極側に挿入した場合のジェット流（流れは負電極から正電極へ）

Fig.2 Jet flow produced from cathode to anode by inserting a plastic plate over the cathode.

て電荷の注入が促進されるものと仮定したが、そのことを更に確認するため図5のようなものを製作した。即ち、内径 11 mm、長さ 20 mm のプラスチックパイプ（塩化ビニル：比誘電率 3.5）の両端にアルミニウム製のリング電極を取り付ける。

上部電極の中心に直径 4 mm の小孔を設け、流出した

液体を導くため内径 4 mm の透明なビニルチューブ（酢酸ビニル：比誘電率 3.5）を接続する。下部には図のように液体の流入口を設ける。

これを絶縁性鉱油に浸し、ビニルチューブを液面の上に出して直流高電圧を印加する。

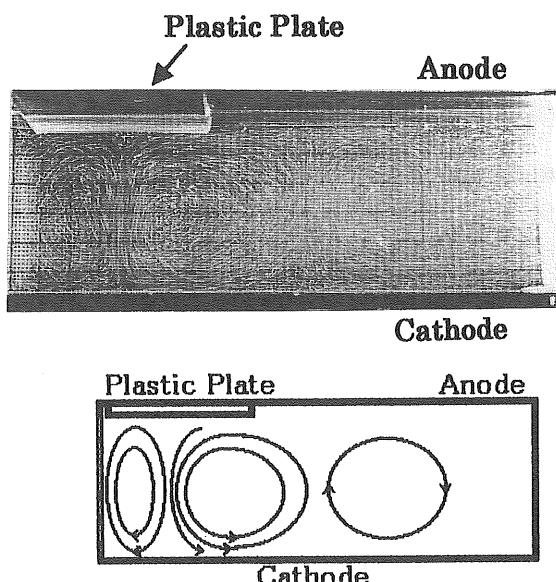


図 3 プラスチック板を正極側左端付近に挿入した場合のジェット流（流れは正電極から負電極へ）

Fig.3 Jet flow from anode to cathode by inserting a plastic plate over the anode at the left end.

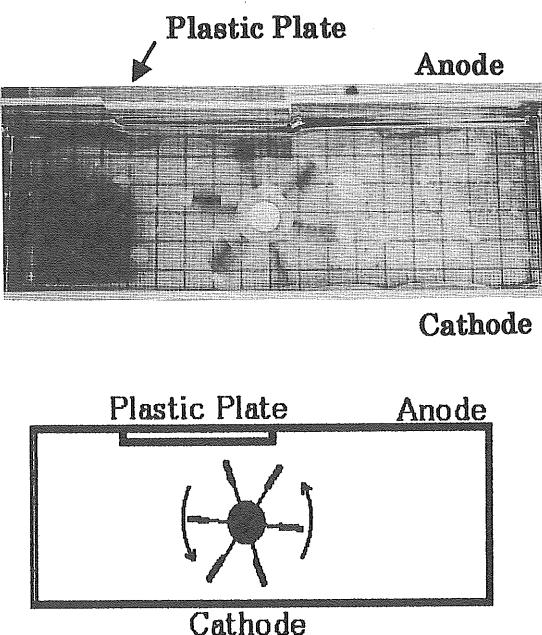


図 4 ジェット流による「水車」の回転（反時計回り）

Fig.4 Rotation (counterclockwise) of a wheel by jet stream.

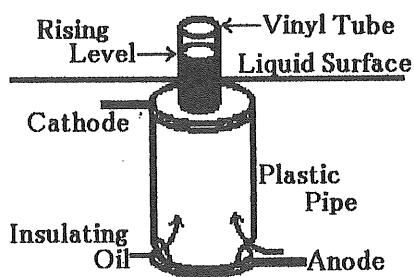


図 5 平行平板電極テストセルによる液面の上昇

Fig.5 Liquid rising in a test cell with parallel plate electrodes.

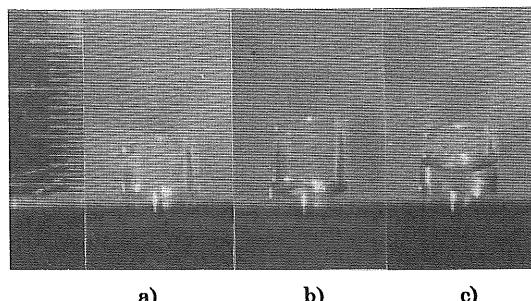


図 6 電圧印加による液体の上昇

a) 電圧を印加せず b) 下部電極に +25 kV 印加

c) 下部電極を一部プラスチックフィルムで覆い +25 kV 印加

Fig.6 Rising of liquid level.

a) Without voltage.

b) +25 kV applied on the bottom electrode.

c) +25 kV applied on the bottom electrode over which the surface is partially covered with a thin plastic film.

図 6 a)は電圧を印加しない状態、b)は 25 kV 印加した場合であるが液体の上昇は殆ど見られない。c)は下部電極の表面を流入口から挿入した幅 4 mm, 厚さ 0.1 mm の塩化ビニルのフィルムで覆った場合で、液体は数 mm 上昇した。上部電極を正極、下部電極を負極とした場合は効果が小さい。

c)の実験においてフィルムの厚さを 0.1 mm および 0.25 mm、電極を覆う面積は下部電極の約 80 %～約 20 % の範囲で連続的に変化させてみたが、液体の上昇値には大きな変化が見られなかった。

これらの結果は下部電極の一部をプラスチックフィルムで覆った場合、下部電極からの電荷注入が増加することを示している。

#### 4. EHDポンプへの応用

平行平板電極による EHD 流動の制御では、容器内にお

ける液体を循環させることはできるが、容器の外部に循環させたり、汲み出したりすることはできない。そこでプラスチックによる電荷注入の促進効果を利用し、更にその電

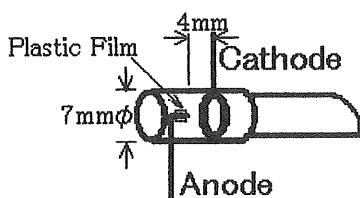


図7 針対リング電極によるEHDポンプ  
Fig.7 EHD pump with needle-ring electrodes.

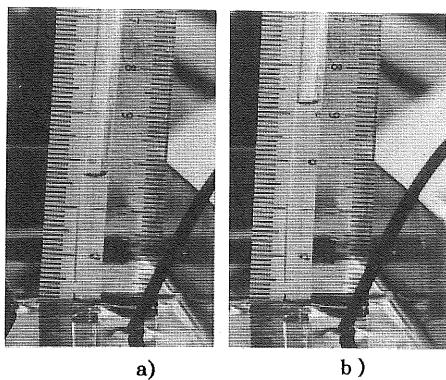


図8 EHDポンプの液面上昇 (20 kV)  
a) カバー無し  
b) 電極の先端付近をプラスチックフィルムでカバー  
Fig.8 Rising of the liquid level in the outlet of EHD pump  
(20 kV).  
a) Coverless.  
b) The needle electrode is partially covered near the  
tip with a thin plastic film.

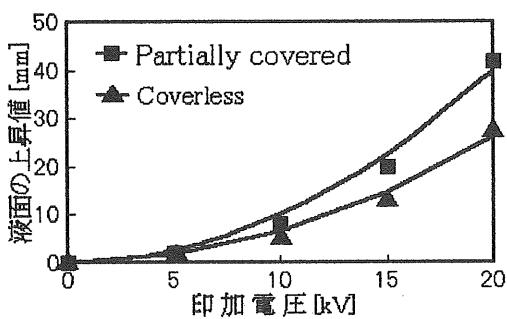


図9 印加電圧に対する液面の上昇値  
Fig.9 Risen height of liquid as a function of the applied  
voltage.

極からの電荷注入を増加させるため、図7のような針対リング電極のEHDポンプを試作した。針電極は直径1.5mmのアルミニウム線で作り、先端の角度は60度にしてある。

リング電極は厚さ1mmのアルミニウム板で作り、直径7mmの円板に直径4mmの同心円の孔を設けたものである。

このポンプを絶縁性鉱油に浸し、針電極とリング電極の間に20kV程度の直流高電圧を印加すると、針電極付近の電界が強いため液体に針電極と同符号の電荷が注入され、イオンドラッグが生じる。ポンプを垂直に設置し、出力用のチューブを十分長くした場合、その中の液面が上昇する。針電極の先端付近をプラスチックフィルムのカバーで覆うと、図8,9に示すように液面の上昇値が増加する。上昇値は印加電圧の2乗にほぼ比例する。

プラスチックカバーを付けたポンプを水平に設置し、印加電圧を20kVにした場合、流量は約80ml/min、電流は0.1μAである。したがってポンプの消費電力は2mW程度であり、極めて小さい。

## 5. 考察

絶縁性鉱油に浸した金属電極の一部をプラスチック板で覆うと、その付近からジェット流が生じることを観測した。この流れによって小型軽量の「水車」を回転することもできる。これはプラスチック板によって電荷の注入が促進されるためと考えられる。その原因については現段階では不明であるが、Felici and Tobazeon<sup>8)</sup>はニトロベンゼンに浸した金属電極を各種のポリエチレンやフッ素樹脂等のフィルムで覆うと電荷注入が生じることを報告しており、これと類似の現象と考えられる。しかしFeliciらは、正塩基を持つポリマーは負電荷を注入し、負塩基を持つポリマーは正電荷を注入すると述べており、筆者等の観測と解釈は一致しない。

この現象の応用として、プラスチックフィルムの電荷注入効果を利用して小型のEHDポンプを製作した。EHDポンプは電極構造としてはネット対ネット<sup>9)</sup>、スクリーン対多孔円盤<sup>10)</sup>等が報告されているが、これらは閉じた容器内の液体または閉じた管内の液体を循環させることを目的としており、液体を他の容器に汲み出すことはできない。

ここでは液体を汲み出すことのできる針対リング電極のEHDポンプを製作し、針電極付近をプラスチックフィルムで覆うことにより、効率を改善できることを示した。1種類の電荷の作用によるEHDポンプを複数個直列に接続し、それぞれの電極に対して交互に正電位、0電位を加えると液体に作用する推力はその向きを交互に変えるため、一般にはこれらの推力は相殺されることが予測される。しかし、ここに述べたEHDポンプでは針対リング電極による不平等電界を用い、更にプラスチックフィルムの電荷注

入の促進効果によって、一方の電荷注入が強いため逆向きの推力は小さく、一方向の推力を容易に得ることができる。したがって、一電源で複数のポンプを作動させて、流量を増加させることができる。

## 6. むすび

絶縁性鉱油中における平行平板金属電極の一部をプラスチックフィルムや薄板で覆うと電荷の注入が促進される現象を観測した。プラスチック板の挿入位置と流れの関係や、軽量の「水車」の回転方向を観測した結果、正負両電極において起こることが確認された。

また、これを応用した小型 EHD ポンプを試作した。このポンプは針對リングの電極構成とし、リングの中心から液体を吐出させる構造にした。針電極の先端付近をプラスチックフィルムで覆うことにより効率を高め、液体を外部に汲み出すことが実現できた。これは多数配列の構成も可能で、閉じた容器内の液体を循環させることにも利用できる。

今後はプラスチックによる電荷注入の促進効果について、そのメカニズムを解明するとともに、より効果的な材料の選択、カバーの形状、設置方法等に関する研究が必要であろう。

## 参考文献

- 1) J. D. Cross and M. Eto: *Proceedings of the 5th Int. Conf. on Conduction and Breakdown in Dielec. Liq.*, p.142, Delft University Press, Delft (1975),
- 2) M. Eto and J. D. Cross: *IEEE Trans. on Elec. Insul.*, EI-12 (1977) 317
- 3) M. Eto: *JJAP*, 24 (1985) 446
- 4) 江渡充芳、加川幸雄：電気学会全国大会講演論文集，p.3-123，電気学会（1994）
- 5) M. Eto and Y. Kagawa: *Proceedings of Int. Conf Modelling, Simulation and Identification*, p.52, IASTED, Wakayama (1994)
- 6) 江渡充芳、加川幸雄：計算電気・電子工学シンポジウム予稿集, p.157, 日本シミュレーション学会 (1995)
- 7) 江渡充芳、加川幸雄：計算電気・電子工学シンポジウム予稿集, p.245, 日本シミュレーション学会 (1996)
- 8) N. J. Felici and R. E. Tobazeon: *J. Electrostat.*, 11 (1981) 135
- 9) J. E. Bryan and J. Seyed-Yagoobi ;*IEEE Trans. Dielec. Elec. Insul.*, 1 (1994) 459
- 10) G. Barbini and G. Coletti: *IEEE Trans. Dielec. and Elec. Insul.*, 2 (1995) 1100