電場印加時における液晶流動の可視化とその応用*

築地 徹浩**

Visualization and Application of Liquid Crystal Flow under Application of Voltages

Tetsuhiro TSUKIJI

1. はじめに

液晶は、我々の身の回りでよく見られるが、液晶の流動については意外と知られていない。液晶をいわゆる機能性流体としてとらえた場合、電場及び磁場にも反応することは、他の機能性流体に見られない液晶の特徴の一つである。他に、液晶は機能性流体として次のような特徴を持っている。1. 粒子が無い均一系流体である。2. 可逆性がある。3. 応答性が良い。(数 ms) 4. 正や負の誘電率異方性や磁化率異方性を持っている。5. ニュートン流動(ネマティック液晶)やビンガム流動(スメクティック液晶)を示す。これらのほとんどの特徴は、液晶の配向変化などに起因する電界効果形に属する現象であり、よく知られている。ここでは、先ず本実験で用いた液晶や他の機能性流体の物性値について説明し、一様電場印加時での平行平板電極間の対流現象の可視化結果を述べ、次に非一様電場強度における誘電泳動(Dielectrophoresis)に関していくつかの可視化結果を示し、液晶の誘電泳動現象について述べる。さらに、試作した円筒電極内での矩形波電圧や三相正弦波電圧を用いた回転電場による液晶の回転流動について説明し、最後にこの回転流動を利用したモータやポンプなどへの応用例を示す。

2. 基本的流れ場での流動

2.1 液晶の物性値

今回使用した液晶は、メルク(株)製のネマティック液晶(K-15)およびそれらの数種類を混合した混合液晶(MLC 6650, MJ 0669)である。さらに、比較のため、一般に、EHD (Electrohydrodynamics) 現象を示すといわれているセバシン酸ジブチル(DIBUTYL SEBACATE (DBS))および誘電泳動現象を示す二種類のフロリナート(FC 70, FC 77)を使用した。MJ 0669 から K 15, MLC 6650 の順に動粘度(20℃)

は 13 mm²/s, 20 mm²/s, 76 mm²/s で、誘電率(液晶分子の軸方向を ϵ 軸, 垂直方向を ϵ 垂直)は同順で、 ϵ 軸; 11.2, 26.1, 62.8, ϵ 垂直; 3.9, 6.0, 10.2 である。フロリナート FC 70 (誘電率 1.98) と FC 77 (誘電率 1.86) の動粘度は 13.4 mm²/s (25℃) と 0.8 mm²/s (25℃) である。

Fig. 1 Parallel plate electrodes

Fig. 2 Visualized result

2.2 平行平板電極間内の流動

Fig. 1 に示すようなギャップ 1 mm の平行平板電極間に混合液晶(MLC 6650)を入れ、直流 3 kV を印加して一様電場のもとで流動を観察した。可視化結果を Fig. 2 に示す。図中の電極間に見られる電場方向の筋が複雑に動き、電極間で不規則な対流が観察された。電場強度の増加とともに速く複雑な流動が見られた。これは、一般に電気流体力学的不安定(EHD instability)と呼

* 原稿受付 2007 年 1 月 19 日

** 正会員 上智大学理工学部機械工学科(〒102-8554 東京都千代田区紀尾井町 7-1, E-mail: t-tukiji@sophia.ac.jp)

ばれているような流動であり、今後、高速度カメラを用いてもっと詳細に調べる必要がある。

2.3 非一様電場強度での流動

Fig. 3 に示すような左側が電場強度が大きい流れ場を作り誘電泳動を示す流体を電極間におくと、電場強度が大きい細い流路の方向に流れる¹⁾。液晶 MJ 0669 を用いて、3 kVDC を印加した場合の可視化結果を Fig. 4 に示す。Fig. 4 (a)では液晶の自由表面は下の方にあるが電場印加後、時間が経過した Fig. 4 (b)では上方向 (Fig. 3 の左方向) に流れている。なお、交流でも同様の現象が見られた。

容器の底と底から 1 mm 離して垂直に立てた棒状の電極を用いて Fig. 5 に示すような非一様な電場の状態

Fig. 3 Dielectrophoresis (DEP)

(a) No field (b) Under voltage

Fig. 4 Observed results (MJ 0669, 3 kVDC)

Fig. 5 Non uniform electric field

(a) No field (b) Under voltage

Fig. 6 Visualized results (MLC 6650, 3 kVDC)

を作り電極の自由表面付近 (Fig. 5 の丸印付近) の流れを観察した²⁾。可視化結果を Fig. 6 に示す。MLC 6650 の液晶を使用し、3 kVDC を印加した場合である。無電場状態を Fig. 6 (a)に示し、電場印加後を Fig. 6 (b)に示す。電場強度が強い部分に液晶が集まり、自由表面の電極付近で液晶が盛り上がっていることが分かる。ここでは見えないが、液晶表面下の棒電極付近で複雑な流動が観察された。

Fig. 7 Parallel plate electrodes

(a) No field (b) Under voltage

Fig. 8 Visualized results (MJ 0669)

Fig. 9 Height of the surface

さらに、二枚の透明電極を用いて Fig. 7 に示すような可視化装置を作り、液晶の上昇を観察した³⁾。液晶 MJ 0669 を用いた場合の可視化結果を Fig. 8 に示す。Fig. 8 (a) が無電場の場合を示し、電場を印加した場合が Fig. 8 (b) で液面が上昇しており、誘電泳動現象を示している。この電場が液面の高さに及ぼす影響を Fig. 9 に示す。参考のために EHD 流体の一つであるセバシン酸ジブチルとフロリナート (FC 77) の結果も示す。誘電率が大きいほど液面が高く、電場に対する液面の高さの変化は二次曲線的である。誘電泳動流体であるフロリナートよりも液晶の方が液面が上昇する。以上のように、液晶は誘電泳動現象を示し、その効果はセバシン酸ジブチルやフロリナートより大きいことが分かる。

3. 回転電場による円筒電極内での回転流動

3.1 矩形波回転電場印加実験

Fig. 10 に示すような円筒電極を製作し、回転電場を印加することで回転流動を引き起こすことを試みたり。使用した液晶は、混合液晶 MLC 6650 である。この円筒電極は、深さ $h=2$ mm、内径 1.1 mm で、内壁に 0.2 mm の間隔で絶縁された 6 個の電極を有している。液晶流動は、電場強度の大きい部分で激しく生じる。その現象が顕著に現れるように、このような小型の

Fig. 10 Cylindrical electrode ($h=2$ mm)

Cylindrical-type の電極を作成した。円筒電極の 6 極に対して周方向に順々に直流矩形波電圧を印加する。電圧は 200 V で一定とし、周波数を変化させた。ここでいう周波数とは、1 秒間に、印加電圧の場所が移動する回数 (例えば、6 Hz なら印加電圧の場所が 1 秒で 1 周する) である。

矩形波電圧を発生させる装置全体の概要を Fig. 11 に示す。まず、信号発生器(D)から任意の周波数の矩形波 (電圧は ± 5 V で一定) を回転電場発生装置(F)に入力することで周波数を決定する (例えば、60 Hz の矩形波を回転電場発生装置(F)に入力したら、電場は 1 秒間に 60 回移動 (10 回転) する。次に、電力増幅器 (パワーアンプ) (E) から、任意の電圧の直流電圧を回転電場発生装置(F)に入力する。ここで入力される電圧の値が、回転電場発生装置(F)から出力される電圧の値となる。例えば、電力増幅器 (パワーアンプ) (E) から回転電場発生装置(F)に直流 200 V を入力すると、回転電場発生装置(F)から出力される電圧も 200 V となる。つまり、回転電場の周波数は、信号発生器(D)により出力された矩形波の周波数に一致し、回転電場の電圧は電力増幅器(E)の電圧に一致する。回転電場発生装置(F)から出力された電圧が、円筒電極(J)に印加される。円筒電極(J)に液晶 MLC 6650 を満たし、鉛直方向から撮影し、DV デッキにて録画、モニタに出力する。電圧 200 V で、周波数を 1 Hz から 200 Hz まで増加させていき、それぞれの周波数における現象の違いを比較した。1 Hz では、電場が印加された電極間において、瞬間的に激しい流動が観察された。印加される電極が周方向時計回りに移動していく様子も、液晶の流動から確認できた。その代表的な様子を Fig. 12 に示す。10~100 Hz においては、円筒容器内の液晶表面の中心付近で液晶が振動し、その外側では不規則に流動するという現象が起こった。100 Hz 以上では、液晶全体が円筒軸中心に対して時計方向 (電場の回転方向) に回転する流動を引き起こすことが分かった。この

Fig. 11 Experimental apparatus

Fig. 12 Flow visualization result

ときの回転数を、撮影した映像内の半径 0.25 mm あたりの円周上を動く気泡が一回転に要する時間を 5 回測定し、平均をとることで求めた。その結果を Fig. 13 に示す。流動回転数は 100 Hz において 0.95 r.p.m. であり、200 Hz で 1.24 r.p.m. であった。

3.2 三相正弦波電圧印加実験

3.1 節で述べたように、矩形波電圧を用いた回転電場によって、電場の回転速度に対しては遅いが回転流動が得られた。そこで、連続的に回転電場を引き起こす三相正弦波電圧を用いた実験を行なった。Fig. 10 に示す円筒電極の向かい合う電極を等電位とし、3 組に対して三相正弦波電圧を印加する。三相正弦波とは起電力、周波数がともに同一であり、位相が $2/3\pi$ (120°) ずつ異なる 3 個の交流起電力（単相正弦波）を一組にしたものである。円筒電極の①→②→③（④→⑤→⑥）の順番に印加することで、電場が右回りに回転しているような状態を作り出す。この場合の流動回転数の測定結果を Fig. 14 に示す。電圧値は、実効値を示す。三相正弦波電圧を液晶 MLC 6650 に印加することで、矩形波電圧印加

Fig. 13 Rotational speed

Fig. 14 Rotational speed

時よりも回転数の大きい回転流動を引き起こすことができた。電圧を上昇させると、液晶は 1 ~ 150 V で小さく不規則に流動し、150 V 付近から回転流動を始める。これ以降、電圧を上げると混合液晶の回転数も増加するという結果が得られた。

Fig. 15 の左図は電圧 255 V における可視化結果の一例を示している。また、右図はその結果に PIV 処理を施したものである。これは、流れの方向を全体的に把握するために平滑化したものである。この結果から、混合液晶が時計方向（電場の回転方向）に回転している様子が分かる。

Fig. 15 Flow under rotational voltage

Fig. 16 Liquid crystal motor

Fig. 17 Photo of motor

Fig. 18 Rotational speed for various fluids

4. 液晶モータと液晶ポンプ

4.1 液晶モータ⁵⁾

本実験で用いた液晶モータの概要を Fig. 16 に示す。絶縁性の円筒は深さ 5 mm、内径 4 mm であり、底面に 6 枚の電極が 0.2 mm の間隔で配置されている。この円筒内に機能性流体を深さ 2 mm まで注入し、さらに流体内に直径 2.6 mm、軸方向長さ 1.5 mm のロータ (Fig. 17 参照) を入れる。本モータでは、電場印加時の機能性流体の回転流動によってロータが回転する。3 章で述べた円筒形状の円筒電極を用いたモータも試作したが、Fig. 16 に示すようなディスクプレートタイプの方の回転数が大きかったので今回はディスクプレートタイプのモータの結果を示す。ロータをビデオカメラで軸方向から撮影することによって回転数を計測した。

本電場印加装置では周波数 50 Hz、電圧実効値 170 V の三相正弦波電圧をスライダックに入力し、このスライダックにより 0 ~ 240 V の範囲で出力電圧を設定する。次に、トランスに入力することで電圧の振幅を約 15 倍に増幅し、電極に印加する。本実験では周波数を一定の 50 Hz にし、電圧の実効値を変化させ、電圧がロータの回転数に与える影響を調べた。

4 種類の液晶とフロリナート (FC 70) を使用流体として用いた場合の電圧とロータ回転数の関係を Fig. 18 に示す。ここで、液晶 US 022 は、ベース液晶 MJ 0669 にカイラル剤を 0.22% 添加し、ピッチ長 60 μm に調製したカイラルネマティック液晶である。なお、本実験では機能性流体内のロータを上部から撮影することによって回転数を 5 回計測し、計測値を平均することによって評価している。また、ロータがほぼ回転しない電圧 300 V 以下の範囲は省略し、353 V ~ 1420 V の範囲を回転数計測の対象とした。本実験の範囲において、周波数を一定にして電圧を増加させると、ロータ回転数も増加することが Fig. 18 から分かる。混合液晶 MJ 0669 使用時にロータ回転数が最も大きいことが分かった。カイラル剤の影響はほとんど無かった。4 種類の液晶に関して、動粘度及び誘電率が低い液晶を用いた場合の回転数は大き

くなるという傾向が見られたが、現時点ではどの特性が回転数に影響を及ぼすかは分かっていない。MJ 0669 (動粘度: 20°C で 13 mm^2/s) に比べて、フロリナート (FC 70: 25°C で 13.4 mm^2/s , 誘電率: 1.98) の回転数は、50% 未満であった。

4.2 液晶ポンプ⁶⁾

試作された液晶ポンプを Fig. 19 に示す。Fig. 10 に示すような円筒電極を外側に有する内部流路の巻き数が 3 のポンプであり、軸方向長さ h は 15 mm、電極幅は 1.2 mm、電極間距離は 0.9 mm で 9 個の電極を有している。流路幅 w は、1 mm と 3 mm の二種類について実験を行なった。この電極に三相交流電圧を印加することにより混合液晶 MLC 6650 の回転流動を得ることができる。さらに、この回転流動により、液晶は螺旋状の流路を流れるため軸方向に流れる。

実験装置の全体図を Fig. 20 に示す。三相交流 50 Hz、200 V をトランスにより増幅させポンプの電極に印加する。U 字管の差圧を読み取ることで圧力を計測する。

結果の一例として、流路幅が 1 および 3 mm の場合の電圧と圧力の関係を Fig. 21 に示す。圧力は、流路幅 w の影響をほぼ受けてなく、電圧の増加とともに二次曲線的に上昇することが分かる。いくつかの液晶で同様の実験を行なったが、粘度や誘電率が大きい混合液晶 MLC 6650 が最も圧力が高かった。これは、モータの回転数の増減の傾向と逆になった。ここでは、一つの形式

Fig. 19 Liquid crystal pump

Fig. 20 Experimental apparatus

のポンプについて述べたが、電場による液晶の流動を利用したいろいろなポンプやアクチュエーターが考えられる。

Fig. 21 Pressure without flow

5. 終わりに

本解説では、基本的な流れ場において、液晶に電場を印加した場合の液晶の流動について述べ、特に非一様電場強度のもとでの液晶の誘電泳動について実験結果を説明した。次に、円筒形の電極を試作し、回転電場を印加した場合の液晶流動について述べ、その回転流動を利用したモータやポンプに関して説明した。ここでは4～5

種類の液晶を用いた実験を行なったが、さらに目的に応じた物性値を持つ液晶の生成はある程度可能であり、非定常電場のもとでの液晶の流動メカニズムの解明とともに、今後の研究が期待される。

本実験を行うにあたり、液晶をご提供していただいたメルク㈱に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 軍司昌秀：誘導泳動を用いた微小液滴の形成と融合，<http://www.washizu.t.u-tokyo.ac.jp/pdf/2002/gunji.pdf>
- 2) 寺坂澄孝，三井和幸，他5名：EHD現象を応用したアクチュエーターの開発，平成16年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集，pp.53-55.
- 3) T.B.Jones, M.Gunji, M.Washizu, M.J.Feldman：Dielectrophoretic liquid actuation and nanodroplet formation, Journal of Applied Physics, Vol.89, No.2 (2001) pp.1441-1448.
- 4) 村田裕司，築地徹浩：回転電場が混合液晶の流動に及ぼす影響，日本機械学会2005年度年次大会講演論文集，Vol.2 (N 0.05-1)，(2005) pp.63-64.
- 5) 早川和憲，築地徹浩：機能性流体を用いたマイクロモータに関する研究，日本機械学会2006年度年次大会講演論文集，Vol.2 (N 0.06-1)，(2006) pp.27-28.
- 6) 築地徹浩，鈴木健太，村田裕司：液晶を用いたポンプモジュールに関する研究，日本機械学会九州支部講演論文集 No.068-1 (2006)，pp.67-68.

口絵1 形状記憶合金とペローズを用いた逆熱対流素子
(大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻 片岡 勲)
(本文86頁参照)

口絵2 液晶モータの内部：混合液晶（MJ0669）を使用した場合、1.3kVの三相交流電圧を用いて約250r.p.m.で回転する。6枚の電極を0.2mm間隔で設置し、ロータ外形は2.6mmである。
(上智大学理工学部機械工学科 築地 徹浩)
(本文92頁参照)

Symmetrical axis

口絵3 針電極の先端から平板電極へ向かうイオン流に沿って誘起した気相EHD現象
：イオン風の（左）速度分布，（右）熾光トレーサによる可視化

(東海大学工学部電気電子工学科 大山 龍一郎)
(本文98頁参照)