研究論文

液 晶 ポ ン プ に 関 す る 研 究*

築 地 徹 浩**, 鈴 木 健 太***, 佐 藤 広 樹***

A Study on Liquid Crystal Pump

Tetsuhiro TSUKIJI, Kenta SUZUKI and Hiroki SATO

A flow visualization of a liquid crystal was conducted under the application of an electric field in a mini cylinder with electrode strips on the inner surface. Three-phase alternating currents were used as rotation electric fields to generate the rotational flow of the liquid crystal. A pump with a spiral flow channel was designed based on the rotational flow mechanism of the liquid crystal by using the three-phase alternating currents. The relation between the maximum pressure and the shape of the flow channel in the pump was investigated for various amplitudes of electric fields. Furthermore, pressure-flow rate characteristics of the pump were measured. The maximum pressure increased when we used a liquid crystal with a high dielectric constant for the constant voltage. Dimensional analysis was conducted to arrange the characteristics of the present pump simply and the non-dimensional flow rate and pressure were almost on one line. The size of our pump can be decreased by further research. This study contributes to the development of a micro-pump in micro-fabricated systems and our pump eliminates mechanical vibration and noise.

Key words : Functional fluid, Pump, Liquid crystal, Flow visualization

1. 緒 言

先に著者らの一人は、内径1.1mm、長さ1～2mm程度の円筒の内壁に6枚の電極板を有する円筒形の電極（ここで円筒電極という。）を製作して、電極の底にふたを設置しその中に液晶を入れ、回転電場の一つとして三相交流電圧を印加して液晶に回転流動を誘起させた¹⁾。さらに、電圧、周波数および液晶の種類が流動回転数に及ぼす影響を調べた。その結果、この方法で液晶に回転流動を誘起できることがわかり、このメカニズムを用いた応用機器の開発が課題として残された。

本報では、前報¹⁾の円筒電極より少し大きめで製作が容易な電極9枚、内径6mm、長さ15mmの円筒電極を新たに製作した。その電極を用いて、回転電場の一つである三相交流電圧印加時における可視化実験を行い、3種類の液晶の回転流動を確認した。次に、この三相交流電圧印加の下での液晶の回転流動のメカニズムを利用した、スパイラル形の流路を内部に有するポンプ（ここでは液晶ポンプという。）を試作し、そのポンプ特性を調べた。すなわち、電圧や液晶の誘電率が

ポンプの最大圧力に及ぼす影響を調べ、ポンプの流量・圧力特性を計測して、次元解析により無次元変数を導入して本ポンプの特性を整理した。本報では、以上の結果を報告する。従来、電場を印加することにより流体に発現する流動を利用したポンプに関する研究は、イオンドラッグポンプ^{2～4)}やEHD (Electro hydro dynamics) 現象^{5, 6)}、ECF (Electro-conjugate fluid)^{7, 8)} および電気浸透流⁹⁾を利用したポンプなどについて行なわれているが、本研究では、液晶を用いている点および印加電圧として三相交流電圧を用いている点が特徴であり、ポンプの構造も単純である。

なお本ポンプは、液晶注入装置や液晶を作動流体とした冷却システムにおける液晶の供給源としての応用などが可能であり、さらなる小型化が期待できる。

2. 主 な 記 号

D	: 流路の全長
E	: 電場強度
g	: 重力加速度
H	: 全揚程
p	: 圧力
p_m	: 最大圧力
Q	: 流量
w	: 流路幅
ε_{para}	: 液晶分子軸と平行方向の誘電率
ε_{per}	: 液晶分子軸と垂直方向の誘電率

*平成19年7月9日 原稿受付

**上智大学理工学部

(所在地 東京都千代田区紀尾井町7-1)

(E-mail: t-tukiji@sophia.ac.jp)

***上智大学大学院理工学研究科機械工学専攻大学院生

(所在地 東京都千代田区紀尾井町7-1)

ϵ_1 : 電極間絶縁部分の誘電率
 μ : 液晶の粘度

3. 可視化実験

3.1 液晶の物性値

本研究で用いた液晶の物性値を表1に示す。K15はネマティック液晶（低分子液晶）であり、MLC6650とMJ0669は数種類のネマティック液晶を混合した混合液晶である。すべて、メルク(株)から提供されている。 ϵ_{para} は液晶分子の軸と平行方向の誘電率であり、 ϵ_{per} は垂直方向の誘電率である。K15に比べて誘電率の高いMLC6650と低いMJ0669を生成し、誘電率の影響を調べた。ただし、本液晶の場合、誘電率の高い液晶を生成すると動粘度も高くなる。

3.2 可視化実験装置および実験結果

これまでの実験で、内径1.1mm、長さ1～2mm程度で内壁に6個の電極片を持つ円筒電極に液晶を入れ、三相交流電圧を印加すると液晶が回転流動を起こすことがわかって¹⁾。そこで今回は、ポンプの製作を容易にするために、前回と類似で少し大きめの内径6mm、長さ15mmで内壁に電極間距離が0.9mmで幅1.2mmの9個の電極片を持つ円筒電極を製作した。三相交流電圧を用いているため電極数は3の倍数になる。この円筒電極を図1に示す。①～⑨は電極である。この円筒電極内に液晶を入れ、軸方向上方より流動状況を観察する。この円筒電極の電極①～⑨に図2に示すような順序で三相正弦波交流電圧を印加して回転電場をつくる。

Table 1 Physical properties of liquid crystals

	MLC6650	K 15	MJ0669
Operating Temperature Region (°C)	-44 ~ 99	23.1 ~ 35.5	(-10) ~ 45.9
Kinematic viscosity (mm ² /s) (25°C)	59.7	22.4	11.0
Dielectric constant (F/m) (relative permittivity) ϵ_{per} (20°C)	9.0×10^{-11} (10.2)	5.3×10^{-11} (6.0)	3.5×10^{-11} (3.9)
Dielectric constant (F/m) (relative permittivity) ϵ_{para} (20°C)	55.6×10^{-11} (62.8)	23.1×10^{-11} (26.1)	9.9×10^{-11} (11.2)
Density (kg/m ³) (25°C)	1099	1020	947

可視化実験装置の全体図を図3に示す。周波数が50Hzで、200Vの三相交流電圧を電圧変換器へ入力する。その出力の0～240Vを15倍に増幅して電極に印加する。今回の可視化実験の目的は、回転電場印加時に液晶が回転する

ことを確認することであるから、回転流動の確認のみを行ない、詳細な回転数の計測は行っていない。図のように円筒電極を設置して、軸方向からデジタルビデオカメラで撮影した。液晶中に混入している気泡を追跡することで回転流動を確認する。

Fig. 1 Cylinder electrode

代表的な可視化結果としてMJ0669の場合を図4に示す。写真からは鮮明でないが、液晶中の気泡の動きを撮影することにより、液晶の回転流動の様子がわかった。図中に矢印で示す点が気泡の一つであり、液面はほぼ平らである。他のK15およびMLC6650の場合も同様であった。印加電圧は1kVである。3種類の液晶の可視化結果から回転電場方向と同じ方向の液晶の回転流動が確認された。

Fig. 2 Three-phases alternating voltage

4. ポンプの特性実験

4.1 実験装置および実験方法

図5左側に示す円筒電極内に図5右側に示すらせん状の流路を挿入してポンプを製作した。流路の深さは1mmで幅は1および3mmである。電場を印加すると液晶が回転流動を起こし、らせん状の流路にそって流れるためポンプの軸方向に流動する。電場の回転方向によって、吸い込み側と吐き出し側が決まる。図5において、ポンプ断面を右方向から見て、時計回りに電場を印加すると右側が吸い込み口になり、左側が吐き出し口になる。

実験装置の全体図を図6に示す。図3の場合と同様に、周波数が50Hzで、200Vの三相交流電圧を電圧変換器へ入力する。その出力の0～240Vを15倍に増幅して電極に印加する。本装置では、入り口管と出口管の高低差は図6に

示すように最大で20mmであり、従って最大圧力が約200Paまで設定可能な装置である。その範囲内で測定するために、本実験では印加電圧は1kVまでとした。ただし、図8の直列接続の実験時のみその高低差を40mmにした。図6に示す入口（ポンプ左側）と出口の管を含む面の傾き θ を変化させて全揚程 H を変化させた。この全揚程に液晶の密度と重力加速度を乗じて圧力 p を算出した。ポンプの出口管の水平部分の液晶の自由表面の移動をビデオ撮影することにより流量を求めた。流量が零の時の最大圧力である。

Fig. 5 Pump

Fig. 3 Experimental apparatus for flow visualization

Fig. 6 Experimental apparatus for pump

Fig. 4 Visualization result for MJ0669

Fig. 7 Relation between voltage and maximum pressure (Influence of flow channel)

Fig. 8 Relation between voltage and maximum pressure (Series circuit)

Fig. 10 Influence of voltage on pressure

Fig. 9 Relation between voltage and maximum pressure (Influence of property for liquid crystal)

4.2 実験結果および考察

まず、混合液晶MLC6650を用いた場合の電圧と最大圧力の関係を図7に示す。本実験での圧力の精度は ± 2.5 Paである。ポンプ内部のらせん流路の幅と巻き数を変えており、軸方向の長さは同じ15mmである。3つの液晶の中で最大圧力が最も大きいMLC6650を用いた結果を示す。巻き数が1に比べ3の方が、流路の長さもほぼ3倍のため最大圧力もほぼ3倍程度あるいはそれ以上である。ここでの実験では、ポンプの全長を15mm一定で実験をしており、巻き数を増やすと流路全長も増えるが、巻き数の倍数にはならず多少小さくなる。さらに巻き数が増えると図5に示す電場の回転方向と流路での流れ方向との角度 α は小さくなる。角度 α が零に近づくにつれて回転電場が流動に及ぼす影響は大きくなると考えられる。従って、その角度の変化の影響などで、電圧が高い領域では流路長さが3倍になっても、最大圧力は3倍より大きめであると思われる。この回転電場と流路での流れ方向との角度が圧力に及ぼす影響は今後検討する予定である。流路幅を1, 3mmとで行ったが両者に大きな違いは見られなかった。

流路の巻き数が3で、流路幅3mmの場合のポンプを直列に接続した場合の実験結果を図8に示す。液晶は、図7と同様な理由からMLC6650を用いた。直列に2個接続した方は、一つのポンプの約2倍の最大圧力が得られている。このように本ポンプは、目的に応じてモジュールとして使用し、直列、場合によっては並列に接続して、必要な圧力や流量を得ることがある範囲内で可能である。

巻き数が3で流路幅3mmのポンプを用いた場合について、液晶の種類が最大圧力に及ぼす影響を図9に示す。MLC6650の最大圧力が最も大きく、図7および8でも見られたように、ほぼ二次曲線的である。表1の誘電率や動粘度の大小と比べてみると、誘電率や動粘度の大きな液晶ほど最大圧力が高いことが分かる。従って、誘電率や動粘度の影響でMLC6650, K15, MJ0669の順に最大圧力が高いと考えられるがどちらの影響が大きいのかは今後の課題である。

流量と圧力の関係を図10に示す。MLC6650を使用し、巻き数3で流路幅3mmのポンプを用いた。印加電圧を500Vから1kVまで変化させた。どの電圧においても、流量に対して圧力はほぼ直線的に減少している。電圧が増加すると、流量・圧力の関係の直線は流量あるいは圧力の増加方向にほぼ平行移動している。図8で述べたようにポンプを2個直列に接続するとほぼ2倍の圧力が得られることや図9で述べたように電圧が圧力に及ぼす影響が二次曲線的であることなどの理由により、直列に接続するポンプ数の増加や印加電圧の増加により流量や圧力をさらに増加させることはある程度可能である。ただし、印加電圧を増加させる際には、絶縁破壊に注意する必要がある。

3種類の液晶の比較を行なった同様な流量・圧力特性の結果を図11に示す。3つの液晶とも流量の増加とともに圧力は直線的に減少しているが、減少割合はMLC6650が最も大きい。K15では700V以下、MJ0669では900V以下では圧力の計測が困難なため行っていない。さらに、同じ圧力および同一電圧で3種類の液晶の流量を比較すると

圧力が零付近を除いて、動粘度が高いすなわち粘性抵抗が大きいMLC6650の流量が最も大きい。MLC6650は誘電率も高いので、高い流量を得る上で、誘電率が高い方が有効であると思われる。

バッキンガムの π 定理を用いて次元解析を行い

$$\mu Q / \{D^3(\epsilon_{per} - \epsilon_1)E^2\} \quad \text{および} \quad p / \{(\epsilon_{per} - \epsilon_1)E^2\}$$

の無次元量を定義した。ここで、 μ は粘度、 Q は流量、 D はポンプ内の流路の全長、 ϵ_{per} は液晶分子軸と垂直方向の誘電率、 ϵ_1 は電極間の絶縁体の誘電率、 E は電場強度、 p は圧力である。電場強度は、印加電圧の実効値を電極間距離0.9mmで割って定義した。 $\epsilon_{per} - \epsilon_1$ は液晶分子軸と垂直方向の誘電率と絶縁体の誘電率との差であり、この差が電場に対する液晶の特性に影響を与えることが、電場が液晶に及ぼす影響を調べた従来の基礎実験でわかっている¹⁰⁾ののでここで使用した。

整理した結果を図12に示す。図10および11に対応して、MLC6650では500V以上、K15では800V以上、MJ0669に関しては1kVの結果を示している。横軸の無次元流量と縦軸の無次元圧力で整理された結果は、ほぼ同一直線になっている。

これらの無次元量においては、流量、圧力、電場強度および液晶の物性値の粘度と誘電率は加味されているが、電極の形状に関するパラメータがポンプ内の流路の全長のみである。図7で説明したように、流路幅の影響は流れる場合でも小さいことが予想されるが、流路の深さの影響は今後調べる必要があると思われる。

図8で示したように、本ポンプを直列接続することにより圧力をポンプのほぼ個数倍増加させることができる。一方、並列接続させることにより、原理的に流量をポンプのほぼ個数倍増加させることができる。要求される流量や圧力に応じて、以上のようなポンプの接続方法および使用する液晶の選択および電圧値の設定を行なう必要がある。現段階では、上述のポンプの使用個数や接続方法、使用液晶および電圧設定によって、液晶注入装置や冷却システムにおける液晶の供給源として、どの程度適用可能であるかなどの十分な検討は行なっておらず、今後本ポンプの小型化とともに具体的なシステムを構築する研究を行なっていく予定である。

5. 結 言

本研究では、回転電場による円筒電極内の液晶の回転流動を利用したポンプを製作した。本ポンプはスパイラル形状である流路を内部に有しており、その巻き数や幅および液晶の誘電率が最大圧力に及ぼす影響を調べた。次に、ポンプの流量・圧力特性を測定して、電場や液晶の物性値がその特性に及ぼす影響を調べた。さらに、流量と圧力の無次元変数を導入してポンプの特性を整理した。本研究で得られた主な結論を以下に示す。

Fig. 11 Characteristics for various liquid crystals

Fig. 12 Result of dimensional analysis

1. ポンプの長さが同一の場合、流路の巻き数が多いほど最大圧力は大きく、流路幅は最大圧力にほぼ影響しない。
2. 印加電圧が同じ場合、誘電率や動粘度が大きな液晶の方が最大圧力が高い。
3. 次元解析で得られた無次元量

$$\mu Q / \{D^3(\epsilon_{per} - \epsilon_1)E^2\} \quad \text{および} \quad p / \{(\epsilon_{per} - \epsilon_1)E^2\}$$

を縦および横軸に取りグラフを描くとほぼ一本の直線で整理できる。ここで、 μ は粘度、 Q は流量、 D はポンプ内の流路の全長、 ϵ_{per} は液晶分子軸と垂直方向の誘電率、 ϵ_1 は電極間の絶縁体の誘電率、 E は電場強度、 p は圧力である。

最後に、本実験装置に関して、いろいろご助言を頂いた昭和理化学器械(株)周藤澄男氏および液晶をご提供いただいたメルク(株)に感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) Tsukiji, T., Murata, Y. and Ito, J., Flow of a Liquid Crystal Mixture in a Mini-Cylinder under Rotating Electric Fields, Proceedings of the Sixth International Symposium on Fluid Power Tsukuba 2005, Nov. 7-

- 10, pp. 595-600.
- 2) Pickard, W.F.: Ion Drag Pumping. I. Theory and II. Experiment: J. of Applied Physics, Vol. 34, No. 2 (1963), pp. 246-258
- 3) 阿比留雅貴, 柳田秀記, イオンドラッグポンプの圧力・流量特性, 日本機械学会講演論文集, No. 054-1 ('05. 3 関西支部第80期定時総会講演会), pp. 11-7&8,
- 4) H. Yamada, S. Hakama, T. Miyashita and N. Zhang: An Investigation of an Ion Drag Pump Using a Needle-mesh Electrode Configuration, Proc. Instn Mecha. Engrs., Vol. 216 Part C, J. Mechanical Engineering Science (2002), pp. 325-335
- 5) Yinshan Feng and Jamal Seyed-Yagoobi: Control of Liquid Flow Distribution Utilizing EHD Conduction Pumping Mechanism: IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 42, No. 2 (2006) pp. 369-377.
- 6) Kano, I., Mizuochi, K. and Takahashi, I., Micro-Electro Hydrodynamic Pump by Dielectric Fluid: Improvement for Performance of Pressure Using Cylindrical Electrodes, Proceedings of the Sixth International Symposium on Fluid Power Tsukuba 2005, Nov. 7-10, pp. 575-579
- 7) 横田真一, 徐佑昔, 吉田和弘, 枝村一弥, 電界共役流体 (ECF) を応用した平面形ポンプ (電子チップ液冷のための ECF ポンプの提案), 日本機械学会 (No. 04-4) ロボティクス・メカトロニクス講演会 '04 講演論文集, pp. 2P1-L1-61 (1-4)
- 8) 桜井康雄, 門井寛人, 中田毅, 枝村一弥, プリント基板多層形 ECF ポンプの開発と液冷システムへの応用, 日本機械学会論文集 (C 編) 72 巻 715 号 (2006-3), pp. 991-996.
- 9) 岡崎隼也, 宮崎康次, 塚本寛, 電気浸透流を利用したマイクロポンプの開発, 日本機械学会 2006 年度年次大会講演論文集 (MECJ-06), 2006, [No. 06-1], No. 2, pp. 291-294
- 10) 鈴木健太, 機能性流体ポンプに関する研究, 上智大学理工学研究科機械工学専攻 2006 年度修士論文, 2007 年 3 月