

電気流体力学ポンプのポンピング力と 安定動作条件に関する研究

中 野 茂

要 旨

近年、携帯用情報機器の小型化にともない、狭い空間に冷却液を送る小型ポンプのような冷却技術の開発が重要な課題となっている。また、医療技術やバイオテクノロジーの発展にともない、化学分析システムの小型化を図る研究を始めとし、微小流体の制御や、微量サンプルの検出など、分析に必要な機能部品のマイクロ化を目指す研究が盛んに行われるようになりつつある。この中で、基板上の高精度で微小な流路に送液するマイクロポンプが必要とされている。これまで、ポンプとしては回転翼を用いる電磁型ポンプが主流であったが、その構造上、微小サイズのポンプを実現するのは容易ではない。回転翼などの可動部があるために、軸受部の機械的磨耗による液中への不純物の混入なども問題となる。

これらの技術的課題を克服するポンプとして、静電型ポンプの一つである電気流体力学(EHD)ポンプは有利な特徴を備えている。EHDポンプは、リング電極対円盤電極のような非対称電極だけで構成され、二つの電極のいずれか一方に直流高電圧を印加して、他方をアースすることにより、誘電性液体をポンピングできる。従来の電磁型ポンプのような機械的な可動部を持たないため、軸受部の摩擦により作動流体を汚す心配がなく、また静止型の故に騒音が出ない。さらに、印加電圧を変えることにより、流体の流量、速度を容易に制御できるなどの有利な特長を有する。

これまで様々なタイプのEHDポンプが作製され、基礎的な特性が明らかにされているが、典型的なEHDポンプとしては、イオンドラッグ型と誘導型の二つが良く知られている。イオンドラッグポンプは1959年O.M. Stuetzerらによって提案された。このポンプでは、誘電性液体中に多量のイオンを注入し、イオンと直流高電界との相互作用によるクーロン力を利用して液体をポンピングする。ところが、ポンピング力を得るために、コロナ放電などにより液中に真電荷を注入する必要があり、これが液体の絶縁劣化を招くという問題を抱えていた。その後、Melcherらによって誘導電荷と交流進行波電界の相互作用を動力源とする誘導型静電ポンプが提案された。ポンプを構成する電極と液体が非接触なため、液体の絶縁劣化によるトラブルを払拭できたが、装置は複雑になってしまった。

本論文では、真電荷を注入しないで電気歪み力をポンピング力とする新しいEHDポンプの開発を究極の目的として、様々な形状の電極から成るEHDポンプを作製し、ポンピングの中心的な力について検討した。初めにEHDポンプの基礎的な特性を明らかにするためにポンプで発生する電気的な圧力を検討した。U字管の片側に、数mmサイズのリング電極と数十mmサイズの円筒電極で構成されるEHDポンプを取り付け、U字管左右の液面差から電気圧を計算で求めた。ところが、印

学位記番号と学位：第12号，博士（工学）

授与年月日：平成14年3月20日

授与時の所属：大学院工学研究科電気電子工学専攻博士後期課程

加電圧を上げていっても液体はポンピングされず、遂には電極間で放電が発生するという不安定現象が時々見られた。そこで、EHD ポンプの安定動作条件を明らかにするために、電極構成、作動流体の種類、リング電極と円筒電極のなす角度、作動流体温度および電極の極性などを変えて実験的に検討を行った。形状とサイズの異なる数種類の電極を作製して検討することにより、リング電極と円盤電極で水平方向送液 EHD ポンプを構成すれば、ポンピング力として電気歪み力を安定に発現できることを明らかにした。

以下に本論文の概要を述べる。

第1章は緒言であり、本研究の背景と目的、および EHD ポンプの応用について述べている。

第2章では、すでに作製されているイオンドラッグ型、誘導型の2種類の EHD ポンプを取り上げ、その特徴および残されていた課題について述べている。続いて、本研究で提案する EHD ポンプの特徴について概説した。

第3章では、リング電極と円筒電極から成る EHD ポンプをアクリル製 U 字管内の片側に取り付け、電圧を印加することにより、重力に逆らって垂直方向に誘電性液体の輸送が可能であることを明らかにした。また、EHD ポンプの基礎特性を把握するために、ポンプの電気圧を液面変位から計算する簡易な方法を述べ、ついで電気圧の印加電圧特性を検討した。電気圧が発生開始する印加電圧には、閾値があり、印加電圧の上昇とともに電気圧は上昇し、印加電圧 30 kV のもとで 810 Pa 程度となることを明らかにした。

第4章は、EHD ポンプを構成する電極の形状およびサイズと、これにより発現するポンピング力の相関について実験的に検討した結果を述べている。

数 mm サイズのリング電極と数十 mm サイズの角筒電極から成る EHD ポンプでは、電極からのコロナ放電が検出された。また、電極の極性を変えても作動流体がカソード側からアノード側へ向かって流れることから、コロナ放電および陰極からの電子放射に起因するクーロン力が中心的なポンピング力であると述べている。リング電極対円筒電極を垂直方向に平行に配置した垂直方向送液 EHD ポンプの場合には、円筒電極からリング電極に向かって液体がポンピングされ、この時コロナ検出器によってコロナ放電の検出が確認されたので、この放電で供給される電荷に働くクーロン力と電気歪み力が同時に液体に作用したと推論している。円筒電極に対してリング電極を垂直に配置した場合は、電界の強いリング電極から電界の弱い円筒電極に向かって液体がポンピングされ、コロナ放電に起因するクーロン力が中心的なポンピング力と述べた。マイクロ EHD ポンプの開発の前段階として、数 mm サイズのリング電極対角筒電極から成る細管内 EHD ポンプでは、コロナ放電が発生しないにも関わらず、電極の極性とは無関係に常にカソード側からアノード側へ向かって液体は流れた。これより、陰極から液中への電子放射に起因するクーロン力が中心的なポンピング力であると述べている。リング電極対円盤電極を循環パイプ内に水平方向に配置した場合は、電極間でコロナ放電は発生せず、電極の極性を換えても液体は円盤からリング電極に向かって流れたので、中心的なポンピング力は、電界の2乗の勾配で決まる電気歪み力であると述べている。

以上の結果より、リング電極対円盤電極で EHD ポンプを構成すれば、真電荷を注入しないで、電気歪み力による水平方向送液 EHD ポンプの開発が可能であると見通しを立てている。

第5章では、EHD ポンプの作動流体としてシリコン油などの無極性液体を用いる場合、電気歪み力が電界の2乗の空間勾配に比例することを定量的に確認した。

第6章では、EHD ポンプの実用上問題となる安定動作条件を、電極の形状と組み合わせ、リング電極と円筒電極のなす角度、作動流体の温度および物性、電極の極性、送液の方向の観点から検討

している。

第7章では、本研究で提案する EHD ポンプの将来的な応用について述べた。初めに、医療やバイオテクノロジーに利用されるマイクロ化学分析装置へのマイクロ EHD ポンプの適用について述べた。ついで、マクロ的な応用として、大容量長距離熱輸送が可能な EHD ヒートパイプの凝縮液還流に EHD ポンプの適用が有用であると述べた。

第8章は結言であり、本研究で得られた結果をまとめている。主な内容を以下に記す。

- (1) EHD ポンプを構成する電極の形状およびサイズを換え、電極構成とポンピング力の相関について検討した結果、リング電極対円盤電極でポンプを構成すれば、電荷注入の不必要な、電気歪み力をポンピング力とする新しい EHD ポンプの開発が可能であるとの見通しを明らかにした。
- (2) U字管の片側に、数 mm サイズのリング電極と数十 mm サイズの円筒電極から成る EHD ポンプを取り付け、重力に逆らって垂直方向に誘電性液体をポンピングすることに成功した。さらに、U字管左右の液面差から電気圧を計算で求め、印加電圧 30 kV のもとで 810 Pa 程度の電気圧を得た。
- (3) リング電極と円盤電極で EHD ポンプを構成して電気歪み力を利用し、水平方向に送液する場合にはポンピングは安定する。
- (4) 作動流体の温度が低く、導電率は 10-10 S/m の程度で、液中の電荷の緩和時間が短いほど、ポンプの動作は安定する。

主指導教員 佐藤 正毅

Study on pumping force and stable operating condition of electro-hydro-dynamical pump Doctorate in Electrical and Electronic Engineering Doctor of Engineering

Shigeru NAKANO

Abstract

The recent development of small size portable information equipment has led to a strong demand for cooling technology such as small size pumps that send coolant to narrow spaces. Research and development has focused on microscopic active parts such as the miniaturization of the chemical analysis system, control of micrometeoroid, and detection of micro samples with the development of medical treatment and biotechnology. A micro pump that supplies liquid with high precision to the microscopic space on a substrate is urgently required. Previously, an electromagnetic type pump utilizing a rotor has been adopted but it is not easy to realize a microscopic electromagnetic pump because of its complex structure. A further problem is that impurities contaminate the liquid due to the mechanical friction of the bearings. An electro-hydro-dynamical (EHD) pump has various desirable features that resolve some of these technical problems. The EHD pump is composed solely of unsymmetrical electrodes such as a ring and a disk. When direct high voltage is applied at one electrode and the other electrode is electrically earthed, the dielectric liquid is pumped. Bearing friction does not contaminate the working fluid and there is no generated noise because the EHD pump has no rotating part and is electrostatic. Furthermore, the mass flow rate and fluid velocity is easy to control.

Many types of EHD pumps, such as the ion drag type (Proposed by O.M. Stuetzer in 1959) and the induction type, have been made in the past and their fundamental characteristics have already been determined. The ion type pumps liquid by utilizing Coulomb force derived from the interaction between a direct electric field and a large quantity of ions emitted into a dielectric liquid. However, the insulation of the liquid is poor as a result of the emission of true charges to obtain the pumping force. The inductively static pump (proposed by Melcher, et al), which is driven by interaction between the inductive electric charge and an alternative traveling electric field, attempts to avoid this poor liquid insulation quality by removing the contact between the electrodes and liquid. The major downside of this method is that the structure of the equipment becomes very complex.

This paper discusses the main pumping forces of pumps constructed by electrodes of various configurations as a background to the development of a new type EHD pump utilizing electrostriction force without the emission of true charges. The fundamental characteristics of the EHD pump are clarified through a discussion of the electrical pressure generated in the

pump. On one side of the U type, the EHD pump is composed of a several millimeter ring and ten several millimeter cylindrical electrodes and the electrical pressure is calculated from the difference between the right and left levels of the liquid. However, in spite of increasing the applied voltage, the liquid was still not pumped and a discharge occurred between electrodes. Therefore, unstable phenomena such as those caused by the influence of the electrode construction, kind of working fluid, angle at which the ring electrode meets the cylindrical electrode, temperature of the working fluid, and the polarity of the electrode were experimentally examined to determine the stable conditions for the EHD pump. As a result, the electrostriction force was found to be generated stably in a horizontal EHD pump consisting of a ring electrode and a disk electrode.

The summaries in each chapter are as follows :

Chapter 1, the introduction, gives a historical background of the EHD, the purpose and the contents of the paper.

Chapter 2 describes features of ion drag pumps and induction pumps and the features of the EHD pump proposed in this paper.

Chapter 3 describes attempts to transport dielectric liquid against gravitational force. The vertical transportation of dielectric liquid against gravitational force is confirmed to be possible by applying voltage to the EHD pump placed in one side of the U type acrylic pipe. In this case, the EHD pump was composed of a ring electrode and a cylindrical electrode. A summary of a method for calculating the electrical pressure from liquid displacement is also described and the fundamental characteristics and applied voltage characteristics under electrical pressure are examined. The applied voltage required to generate the electrical pressure was found to have a threshold value. The electrical pressure was increased with a rise in the applied voltage and reached 810 Pa at a voltage of 30 kV.

Chapter 4 describes the results of experiments aimed at determining the correlation among the electrode shape and the size of an EHD pump and its pumping force.

Corona discharge from electrodes was detected in pumps consisting of several millimeter ring electrodes and tens of millimeter square cylindrical electrodes. Because the working fluid flows from the cathode to anode when the polarity changes, the pumping force seems to consist mainly of Coulomb force generated by corona discharge or electron emission from the cathode. In a vertical transmission pump in which ring and cylindrical electrodes are arranged in parallel in the vertical direction, liquid was pumped from the cylindrical to the ring electrodes and the corona discharge was detected, so the Coulomb force supplied to the electric charges by this discharge, along with the electrostriction force, apparently acts on the liquid. When a ring electrode is arranged perpendicularly to a cylindrical electrode, liquid is pumped from the ring electrode with a strong field to the cylindrical electrode with a weak field, so the Coulomb force generated by the corona discharge is the pivotal pumping force. In an intravascular EHD pump consisting of several millimeter ring and square cylindrical electrodes, which was developed prior to an EHD micropump, liquid flows from the cathode to the anode regardless of the polarity of the electrode in the absence of the corona discharge. This result indicates

that the Coulomb force generated by electron emission from the cathode into the liquid is the pivotal pumping force. If the ring and the disk electrodes are placed horizontally within a circulation pipe, the corona discharge does not occur between electrodes, and the liquid flows from the disk to the ring electrodes when the polarity of the electrodes changes, so the pumping force is shown to consist chiefly of an electrostriction force, which is determined from the square of electric field.

The above results indicate that a horizontal transmission EHD pump, which utilizes the electrostriction force and does not require true charges, can be developed using the ring and the disk electrodes.

Chapter 5 quantitatively demonstrates that the electrostriction force is proportional to the space slope representing the square of the electric field when nonpolar liquids such as silicone oil are used as the working fluid for EHD pumps.

Chapter 6 discusses the practical conditions for stable operation of EHD pumps from the perspectives of the shape and combination of electrodes, angles formed between the ring and the cylindrical electrodes, temperature and properties of working fluids, polarity of electrodes, and the direction of liquid transmission.

Chapter 7 describes future applications of EHD pumps that are proposed in this paper. The chapter begins with a discussion of the applications of EHD pumps to micropumps of micro chemical analyzers used in medical and biotechnological fields. This is followed by a discussion of the usefulness of EHD pumps for the reflux of condensate from large-capacity long-range EHD heat pipes.

Chapter 8 concludes and summarizes the results of this study. The main points are as follows:

- (1) The correlation between the electrode configuration and the pumping force was studied by using various shapes and sizes of electrodes for EHD pumps. Developing an EHD pump that uses electrostriction force as the pumping force and does not need added electric charges is possible when ring and disk electrodes are used.
- (2) An EHD pump consisting of a several millimeter ring and cylindrical electrodes is attached to one side of a U-tube and dielectric liquid is pumped up in the vertical direction contrary to specific gravity. Electrical pressure is then calculated from the difference in the surface levels between the two ends of the U-tube and an electrical pressure of about 810 Pa is obtained at an applied voltage of 30 kV.
- (3) Stable pumping can be achieved by using a pump, consisting of ring and disk electrodes, and using an electrostriction force to transport the liquid horizontally.
- (4) Pumping operation is more stable when the relaxation time for the electric charges in the liquid is shorter, since the temperature of the working fluid is low and electric conductivity is about 10-10 S/m.

Professor (Chairperson) Masaki SATO