

## 論 文

## 分極効果を利用する EHD ポンプの効率

佐藤 正毅\*, 矢部 彰\*\*, 西田 修三\*\*\*

(1996年1月18日受理)

## Efficiency of Electrohydrodynamic Pump Utilizing Polarization Effect

Masaki SATO, \* Akira YABE, \*\* and Shuzo NISHIDA, \*\*\*

(Received January 18, 1996)

The objective of the present paper is to discuss the efficiency of the electrohydrodynamic (EHD) pump utilizing polarization effect, assuming that the relation between the volume flow rate and the electric pressure is described by Hagen Poisseille's law in the recirculating flow of the insulating liquid. Main results can be summarized as follows: (1) The efficiency of the EHD liquid pump is increased with a rise in the input voltage and reaches 96.6% at 10 kV. (2) The efficiency of the EHD liquid pump depends on the pumping loop geometrical configuration.

## 1. はじめに

電気流体力学は、高電界下の絶縁性流体の振舞いを扱う、電磁気学と流体力学の境界領域の分野であり、最近になって新しい現象が次々に発見された。電気流体力学(略して EHD) 液体ジェット現象もその一つである。アクリル製容器の底部に直径 130 mm の真鍮製円盤電極を取り付け、これより上方 3.5 mm の位置に円盤と平行に太さ 5 mm で内直径 5 mm、外直径 15 mm のリング電極をつり下げ、容器を絶縁性液体で満たした後、電極間に +25 kV の直流高圧を印加したところ、リング内から上方に流速 67 cm/s のジェット流が発生したと報告されている<sup>1)</sup>。

これに対し、本論文では、絶縁性パイプ内に角筒電極とリング電極を 2 mm 程度離して取り付け、R123 などの絶縁性液体でパイプを満たした後に、電極間に 10 kV

の直流高圧を印加した際に観測された EHD ポンプ現象<sup>2)</sup>について述べる。この現象は、上記の EHD 液体ジェット現象を、パイプ内の絶縁性液体中でも実現できないものかと著者の一人が予備実験を繰り返していたところ、観測された新しい現象である。著者らは、この現象を「EHD 液体ポンプ現象」と呼ぶことにした<sup>3)</sup>。その後、EHD 液体ポンプ流れの発生機構の解明を実験的検討によって進めているが、この流れの性質は、先に発見された EHD 液体ジェット流とは異なることが明らかになってきた<sup>4)</sup>。共通な点は、液体の駆動力は非対称電界とそれによる分極電荷との相互作用力であることで、液中への真電荷注入によるクーロン力ではないことである。このため、絶縁性液体の分極効果のみを利用する分極型 EHD ポンプでは、流体の絶縁劣化を格段に避けることができる。その他に、分極型 EHD ポンプは、単純な構造、低コスト、低電力消費、静止型ゆえにポンプ内からの不純物混入を避け得るなどの長所を有する。さらに、ポンプ印加電圧の極性を変えて、絶縁性液体の流れ方向を容易に変えることができるのも、分極型 EHD ポンプの長所である。この分極型 EHD ポンプを実用化できれば、大容量変圧器や地下ケーブルの冷却用絶縁油輸送装置のコンパクト化、低コスト化が可能となる。さらに、将来、太陽熱発電や地熱供給システムにおける大容量長距離熱輸送用 EHD ヒートパイプ<sup>5)</sup>、半導体産業に不可欠な超純水計測用ミニポンプにも応用可能である。

各種の EHD ポンプは、静電型機器という点では共通でも、液体の駆動力によって異なったタイプに分類できる。最も一般的なものは、絶縁性液体に真電荷を注入し

キーワード : EHD ポンプ、効率、非一様電界、分極効果、ハーゲン・ボアズイユの法則

\* 八戸工業大学電気工学科 (031 八戸市大字妙字大開 88-1)

Department of Electrical Engineering, Hachinohe Institute of Technology, 88-1, Myo Ohbiraki, Hachinohe, 031 Japan

\*\* 工業技術院機械技術研究所 (305 つくば市並木 1-2)  
Mechanical Engineering Laboratory, AIST, MITI, 1-2, Namiki, Tsukuba, 305 Japan

\*\*\* 八戸工業大学土木工学科 (031 八戸市大字妙字大開 88-1)

Department of Civil Engineering, Hachinohe Institute of Technology, 88-1, Myo Ohbiraki, Hachinohe, 031 Japan

て、これと電界との相互作用力を利用するイオンドラッグ型ポンプである。これとタイプを異なるものに、Yagoobi らが開発した誘導型 EHD ポンプがあり<sup>6)</sup>、誘導電界と電荷間の相互作用力を利用するポンプである。いずれのポンプにおいても、低電力消費を理由に、ポンプの効率は電磁型ポンプに比較して高く、その試算結果も報告されている<sup>7)</sup>。ところが、著者らが提案している分極型 EHD 液体ポンプの効率は、ポンピング機構の解明に主眼をおいていたので、充分に検討していなかった。

そこで、本論文では、ポンプ印加電圧をパラメータとして、R123 などの絶縁性作動流体のパイプ内流速分布をトレーサ法で明らかにし、この基礎データからポンプ効率を求める簡易な方法を述べ、分極型 EHD ポンプ効率と印加電圧の関係を明らかにする。ポンプ出力は、R123 の体積流量と電気的なポンプ圧の積となるが、この電気圧を、ハーゲン・ポアズイユの法則と実験結果から求める方法についても詳述する。

## 2. 実験装置および方法

図 1 に EHD ポンプの実験装置を示す。図 1(a) は平面図で、図 1(b) が前面図である。作動流体に選んだ R123 が循環する絶縁性パイプは、R123 との化学反応を防ぐために塩化ビニールで試作した。フランジで接合した直管路は、流速測定のために、断面積が  $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$  の透明な塩化ビニール製角筒パイプにした。この中に断面積が  $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$  の銅製の角筒電極を埋め込み、この電極から右に  $2 \text{ mm}$  の位置に銅製リング電極を取り付けた。図 2 がリング電極で、サイズも示してある。電極部分の詳細は、図 1(b) に示してある。図でリング電極から右方  $40 \sim 60 \text{ mm}$  の位置で流速の測定を行った。

図 3 は、角筒およびリング電極付近の流速測定面を表す。透明な塩化ビニールパイプの下方から、スリットを経て薄く絞られた、プロジェクタからの光を送り、この光面上で流速をトレーサ法で測定した。図 3 の 3 通りの光面で流速測定を行った。ここで、トレーサ法について述べる。実験に供した作動流体は R123 であるが、この中に、流れを可視化して流速を測定するために、少量のアルミ粉を混入した。リング電極をアースし、角筒電極に  $+2 \text{ kV} \sim +10 \text{ kV}$  の直流高圧を印加すると、R123 がリングから角筒に向かって流れた。この時、アルミ粉が、R123 の流れと一緒に動き、プロジェクタからの光を受けて光点として運動した。この多数の光点の運動をビデオ撮影しておき、その後に、この流れの可視化による映像をディスプレイに映し出し、画面上に描かれた基準の距離を光点が通過するのに要した時間から、R123

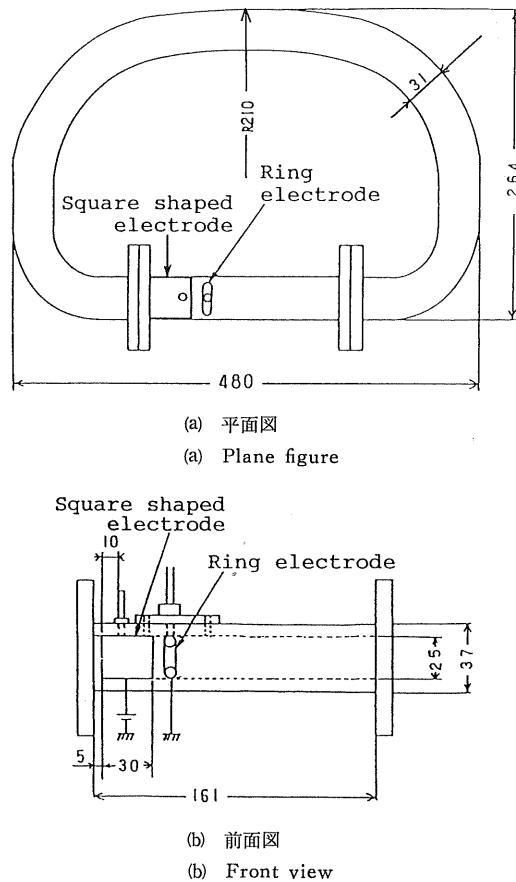


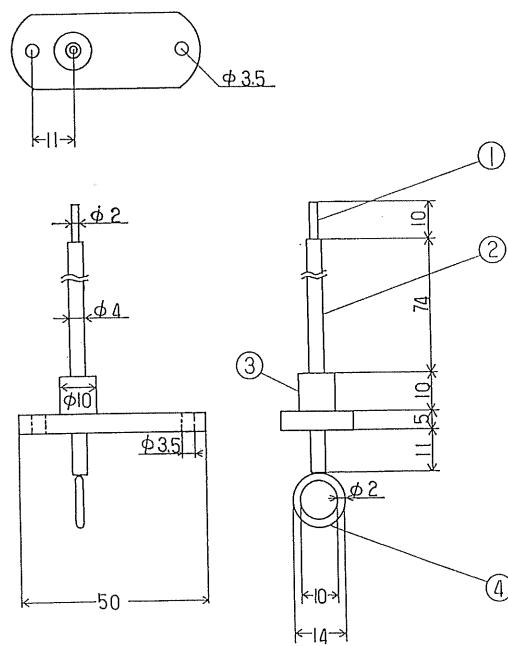
図 1 EHD ポンプの実験装置  
Fig. 1 Experimental apparatus of EHD pump.

の流速を求めた。これがトレーサ法による流速測定である。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 作動流体の流速分布

EHD ポンプの効率を算定するためには、3.5 節で述べるように、作動流体の体積流量が必要になる。この体積流量を、今回は、R123 の流速分布から求めることにしたので、印加電圧をパラメータとした R123 の流速分布を実験的に求めた。図 4 に、角筒電極印加電圧をパラメータとした作動流体 R123 の流速分布を示す。図 3 に示す流速測定面を手前から A, B, C 面とすると、これらの上の速度分布が、それぞれ図 4(a), 図 4(b), 図 4(c) である。横軸が R123 の流速  $U$  で、縦軸は、測定面の水平方向中心線からの距離  $h$  を表す。印加電圧は、 $2 \text{ kV}$  から  $10 \text{ kV}$  まで  $2 \text{ kV}$  きざみで変えた。測定面 B は、図 3 の測定領域の中央に位置するので、この面上での流速は、他の二つの測定面上での流速を凌ぎ、 $h=0$



①導線 ②絶縁パイプ ③電極支持部 ④リング電極  
 ①Conductor ②Insulated pipe ③Support for electrode ④Ring electrode

図2 リング電極

Fig. 2 Ring electrode.

mm で、最大流速は 8.32 cm/s となった。 $h=0$  mm の位置からアクリル製パイプの内壁に向かうにつれて、流速は減少する。入力電圧  $V_1$  が 2 kV から 10 kV まで上昇するにつれ、流速は増していく。これは、入力電圧の上昇とともに、角筒対リング間の非一様電界の強度と分極電荷密度が増え、これらの相互作用力である液体駆動力が大きくなるためである。

### 3.2 作動流体体積流量と入力電圧の関係

流速分布を用いて、作動流体の体積流量を算出する簡単な方法を述べる。図3の流速測定面 A, B, C の流速分布から、それぞれの面上の平均速度  $u_{av}$  を求める。測定面Bに着目すると、このB面を中心として左右にそれぞれ 3 mm 程度離れた位置に仮想的面を考え、この面と角筒パイプの上下の内壁によって仕切られる直方体の仮想空間を考える。横幅  $W$  が 6 mm で高さ  $H$  が 24 mm の長方形の断面を有する仮想の流路で、R123 は前述の平均流速で流れているとすると、この仮想流路中の体積流量は  $WHu_{av}$  となる。測定面 A, C の近傍でも、同様の近似計算を行って、測定面付近の R123 の体積流量を求め、これらを加えると、流速測定領域を流れる R123 の体積流量が近似的に求まる。得られた結果を、図5に示す。R123 の体積流量  $Q$  と入力電圧  $V_1$  の関係である。 $V_1$  の増加とともに、 $Q$  は放物線状に増加している。

### 3.3 電気圧と入力電圧の関係

図1に示すアクリル樹脂製の循環パイプを流れる R123 の流量  $Q$  と、角筒対リング電極間の圧力差 ( $P_1 - P_2$ ) の間に、ハーゲン・ポアズイユの法則

$$Q = \frac{\pi a^4}{8l\eta} (P_1 - P_2) \quad (1)$$

が成立すると考える。すなわち、この法則を図1のような曲管にも拡張して適用する。ここで、 $a$ : パイプの内半径 [m],  $l$ : パイプの全長 [m],  $\eta$ : 粘性係数 [ $Ns/m^2$ ],  $P$ : 圧力 [ $N/m^2$ ] である。(1)式で、 $P_1 - P_2$  は、通常は水平に配置したパイプの両端の圧力差を表すが、図1においては、角筒電極とリング電極間で、分極効果によって発生した電気圧の差  $\Delta p$  と考えるわけである。すなわち、角筒電極の左端とリング電極を両端とする水平なパ

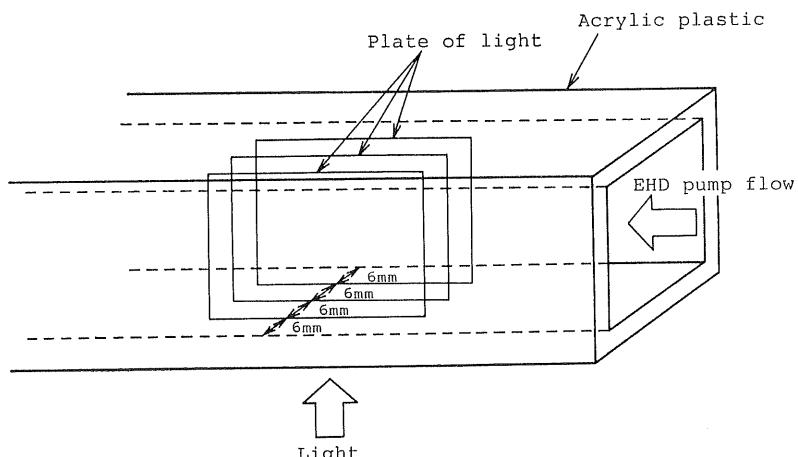
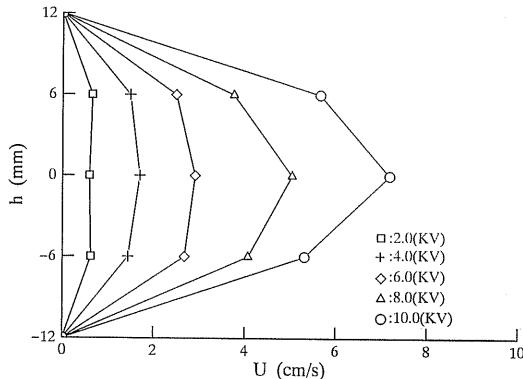


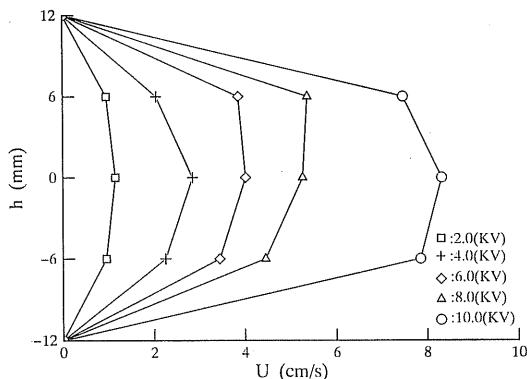
図3 流速の測定面

Fig. 3 Measuring plate of the velocity.



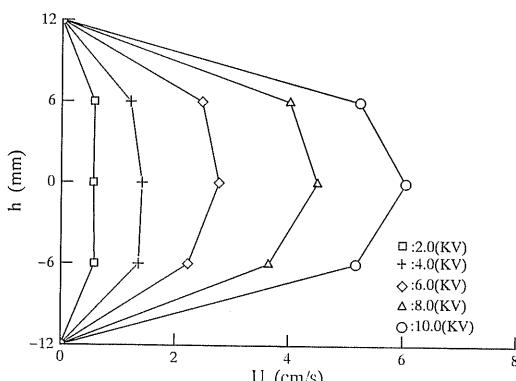
(a) 測定面Aの流速分布

(a) Velocity distribution of measuring plate A



(b) 測定面Bの流速分布

(b) Velocity distribution of measuring plate B



(c) 測定面Cの流速分布

(c) Velocity distribution of measuring plate C

図 4 作動流体の流速分布

Fig. 4 Velocity distributions of the working fluid.

イフが、図1のように曲げられたと考える。このようなパイプ流れについても(1)式が成立すると考えるのはそれほど不自然でない。そこで、 $(p_1 - p_2)$ を電極間液体の

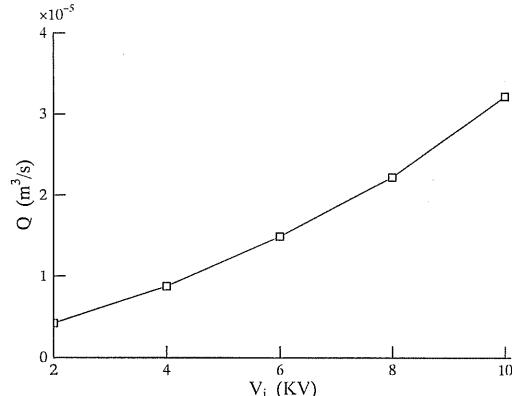


図 5 作業流体体積流量と入力電圧の関係

Fig. 5 Relation between volume flow rate and input voltage.

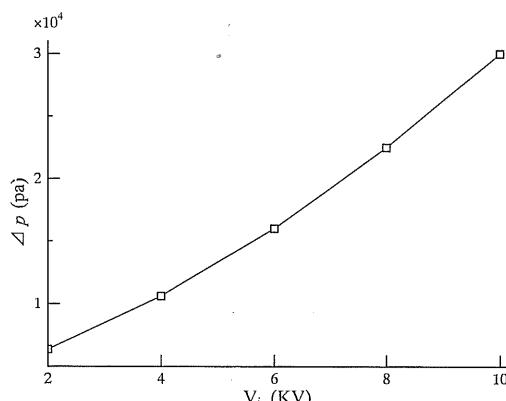


図 6 電気圧と入力電圧の関係

Fig. 6 Relation between electric pressure and input voltage.

表 1 数値例

Table 1 Numerical example used in calculation.

$$a = 1.2 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$\eta = 4.5 \times 10^{-3} \text{ Ns/m}^2$$

$$l = 9.66 \times 10^{-1} \text{ m}$$

分極効果によって発生した電気圧  $\Delta p$  で置き換えると、(1)式は

$$Q = \frac{\pi a^4 l}{8 l \eta} \Delta p \quad (2)$$

となる。従って、前節で  $Q$  と印加電圧  $V_i$  の関係を得ているので、これと(2)式から、電気圧  $\Delta p$  とポンプ入力電圧  $V_i$  の関係を得る。これを図6に示す。(2)式より、 $Q$  は  $\Delta p$  に比例するので、図6は図5と同様に放物線状を呈し、 $V_i$  の増加につれて  $\Delta p$  は増える。表1には(2)式と図5から体積流量  $Q$  を求めるために用いた、

数値例を示す。数値としては、R123 の粘性係数の他に、(2)式中の内半径  $a$  と全長  $l$  も与えてある。 $a$ についてには、内直径 24 mm の塩化ビニール製パイプを用いたので、 $a=12 \text{ mm}$  として計算した。図 1(a)において、R123 の流路の断面積はすべて円形ではなく、電極取付部および流速測定部の直管部で、断面は一辺が 25 mm の正方形である。しかし、この部分は計算を容易にするために内直径 24 mm のパイプで近似した。次に、R123 の流路の全長は、図 1 に示す寸法から約 1 m となる。図 1(b)で、左側のフランジの近くの角筒とリング電極を EHD ポンプとして今回用いたが、角筒の左端とリングの右端の距離はせいぜい 3.4 cm 程度であり、この間で R123 をポンピングする電気圧  $4p$  が発生している。図 1(a)の流路を、これから仮に二つの電極を除いて、水平管に整形したとすると、(2)式で全長  $l$  は約 96.6 cm となる。この水平管の両端で圧力差が  $4p$  と考えてよい。 $V_1$  を増やせば、 $4p$  を大きくして  $Q$  を増やせるが、 $V_1$  を上げ過ぎると、電極間の R123 が絶縁破壊されるので、 $V_1$  には上限がある。

### 3.4 ポンプ入力電流と入力電圧の関係

図 7 に、角筒とリング電極からなる EHD ポンプの入力電流と入力電圧の関係を示す。特性は、 $2 \text{ kV} < V_1 \leq 10 \text{ kV}$  の範囲では直線を呈する。角筒電極に正電圧を印加し、リングは接地しているので、強い非一様電界によって R123 は分極し、角筒側が負、リング側が正の無数の双極子が発生する。この双極子発生の過程で移動する電荷による電流が、図 7 の入力電流と考えられる。リング電極の太さが 2.0 mm 程度で、しかも電極間距離が 2 mm 程度なので、電極間でコロナ放電が皆無とは断定しがたい。しかし、仮にコロナ放電が発生しているとしても、入力電流の主体は分極による電流と考えられる<sup>1)</sup>。

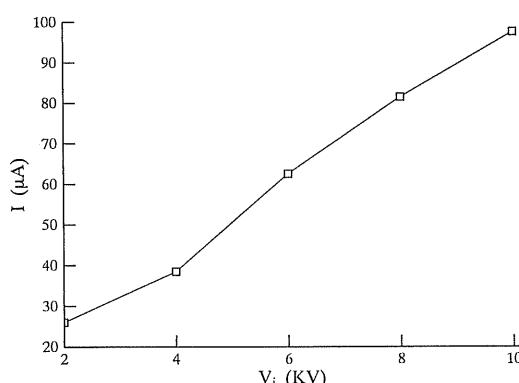


図 7 ポンプ入力電流と入力電圧の関係

Fig. 7 Relation between pump input current and input voltage.

### 3.5 ポンプ効率と入力電圧の関係

図 1において、フランジで挟まれた長さ 16.1 cm の直管部の断面積を  $S$  とすると、角筒電極とリング電極間で R123 を押し流す力は、 $S4p$  となり、断面上の R123 の平均流速を  $U$  とすると、ポンプ出力  $P_{out}$  は

$$\begin{aligned} P_{out} &= U \cdot (S4p) \\ &= Q \cdot 4p \end{aligned} \quad (3)$$

となる。ポンプ入力は  $V_1 \cdot I$  であるから、ポンプ効率  $\eta_p$  は

$$\eta_p = \frac{Q \cdot 4p}{V_1 \cdot I} \quad (4)$$

となる。図 5、図 6、図 7 と(4)式から、ポンプ効率と入力電圧の関係として、図 8を得る。効率  $\eta_p$  は入力電圧  $V_1$  の上昇とともに放物線状に上昇し、 $V=10 \text{ kV}$  で 96.6% にも及ぶ。静電型機器である EHD ポンプは、一般的に高効率が特徴であり、Crowley らも、エタノールを作動流体に用いる EHD ポンプの効率を算定し、98% を得ている<sup>2)</sup>。本来、水平管内流に適用されているハーゲン・ポアズイユの法則を、EHD 循環流にも拡張して得た、分極型 EHD ポンプの効率は 96.6% にも及び、Crowley 氏らの報告した値とほぼ同程度である。しかし、この高効率は、図 1(a)から明らかに、R123 の流路が長くなると維持できないと思われる。ポンプ入力が同じであれば電極間に発生する電気圧も同じであるので、R123 の流路が長くなると、管の内壁における摩擦力が R123 の流れを妨げる距離も増すので、流速は減少する。従って、(4)式で  $Q$  が減少するので、 $\eta_p$  は低くなると考えられる。すなわち、本論文で扱った、図 1 の作動流体が還流する分極型ポンプでは、効率は流路の幾何学的形状と寸法に影響されると考えられる。これに関しては、Yagoobi らも、イオンドラッグ型 EHD ポンプに関して同様のことを述べている<sup>3)</sup>。

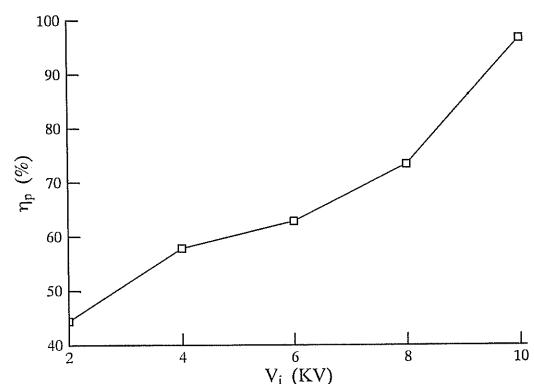


図 8 ポンプ効率と入力電圧の関係

Fig. 8 Relation between pump efficiency and input voltage.

#### 4. おわりに

絶縁性パイプ内に、角筒とリングなどの非対称電極を数mm程度離して取り付け、R123などの絶縁性作動流体を充分に注いだ後、電極間に10kV程度の直流高圧を印加した際に、分極効果によって発生する管内EHD流れを扱ってきた。この流れにはEHD液体ポンプ流れとすでに命名もしてあった。ところが、この分極効果を利用する新型EHDポンプの効率をまだ検討していなかった。そこで、EHD管内循環流に対してハーゲン・ポアズイユの法則を拡張して適用し、ポンプ効率を算定する簡単な方法を提案した。得られた主な結果を以下に要約する。

(1) 分極型EHDポンプの電気圧は、入力電圧の増加につれて、放物線状に増える。

(2) 静電型機器であるEHDポンプは、一般に高効率が特徴であるが、新たに提案する分極型EHDポンプでも、効率は、入力電圧の上昇とともに放物線状に増加し、電圧10kVで96.6%にも及ぶ。

(3) 分極型EHDポンプの効率は、作動流体の流路の幾何学的形状にも依存すると考えられる。

最後に、本論文の図面の作成に協力いただいた八戸工業大学電気工学科電力工学講座 馬場 誠技術職員に感謝申し上げる。

#### 参考文献

- 1) A. Yabe and H. Maki: Int. J. Heat Mass Transfer, 31 (1988) 407
- 2) 佐藤正毅, 矢部 彰: 平成2年電気学会全国大会講演論文集, p. 1457, 電気学会 (1990)
- 3) M. Sato, A. Yabe and T. Taketani: Proceedings of the ASME/JISME Thermal Engineering Joint Conference, Ser. 3 (1991)
- 4) 佐藤正毅, 矢部 彰: 電気関係学会東北支部連合大会講演論文集, p. 121, 電気学会 (1991)
- 5) M. Sato, S. Nishida and F. Noto: Solar Engineering, ASME, 1 (1992) 155
- 6) J.S. Yagoobi: J. Heat Transfer, 112 (1990) 1095
- 7) J.M. Crowley, G. Wright and J.C. Chato: IEEE (1987) 1433