補助電極付き可逆転型イオンドラグマイクロ アクチュエータの研究

正 員 土田縫夫 (豊田工業大学) 非会員 牧内弘和 (愛知工業大学)

非会員 大澤 潤 (豊田工業大学) 正 員 大橋朝夫 (愛知工業大学)

Studies on reversible drive ion drag micro-actuator with subsidiary electrodes

Nuio TSUCHIDA' Member, Hirokazu MAKIUCHI'' Non-member

Jun OHOSAWA' Non-member, Asao OHOHASHI'' Member

(':Toyota Technological Institute, '' :Aichi Institute of Technology)

We have developed micro actuators using ion drag force generated by applied DC voltage. Accelerating electrodes for positive and negative ion were alternately placed, and a half of each electrode was covered with insulating film. The operating liquid was a mixture of silicone oil and butyl alcohol. Pressure was increased rapidly to the number of active pairs of electrode in the ion drag pump with such structure of 18 mm in diameter and 30 mm in total length. When a set of subsidiary electrodes covered with insulating film was used instead of covering a half of each electrode, the flow direction was reversed. This was explained by formation of an ion sheath around each subsidiary electrode, since the subsidiary electrode covered with insulating film prohibits charge exchange. The ion sheath would build up a new electric field opposite to that of the applied voltage. This effect was then applied to a novel ion drag motor, which had subsidiary electrodes between each of the main bare electrodes. In this new motor, by changing the polarity of the applied voltage to the subsidiary electrodes, we could successfully control the rotating direction of the motor.

キーワード：イオンドラグ力、マイクロアクチュエータ、双方向回転、補助電極、DC駆動

1. まえがき

マイクロマシンを動かすためには高性能マイクロアクチュエータの実現が不可欠で、色々な駆動原理のものが研究されている^{(1),(2)}。通常使用されるアクチュエータの中で油圧シリンダ、油圧モータなど流体を応用するものの比率が非常に高いが、マイクロマシンの分野でも流体を応用する高性能マイクロアクチュエータの実現が強く望まれている。液体流動を応用したマイクロアクチュエータとしても色々な原理のものが考案されており、圧電効果^{(3)・(4)}、EHD現象^{(5)・(6)}、進行波電界⁽⁷⁾、静電気⁽⁸⁾及び熱による相変化⁽⁹⁾などを応用したものの研究が行われているが、十分な性能のものが無いのが現状である。

筆者らはイオン加速電極の片側半分を絶縁被膜で覆った非対称な電極構造を採用することにより、従来は利用が困難と考えられた両イオン性物質(正・負のイオンに成りやすい)を液体中の不純物として採用し、かつ正・負の電極を交互に配置して低電圧でイオン加速を連続的に行う機構

を考案した。そしてこの機構を回転型モータやマイクロソラポート及びマイクロポンプに応用し、駆動することに成功した^{(10)・(11)・(12)}。しかし、これらのアクチュエータの駆動方向は一方向的であった。マイクロポンプにおいて、電極に金網を用いる場合、電極の半分を絶縁膜で覆うことは非常に困難であり、より作りやすい構造のものとして、裸の電極と全体を絶縁塗装した補助電極を組み合わせた新しいマイクロポンプを考案した。このような構造のポンプでは、今までに開発した電極構造のマイクロポンプやイオンドラグモータから予想される方向とは、全く逆の方向に流動が起こることがわかった⁽¹³⁾。この原因として、補助電極の周りにヘテロイオンが蓄積してイオンシースができ、大きな逆電界が発生するためと考えられた。

本報告では、半分を絶縁した電極を持つイオンドラグポンプの加圧特性について述べ、次に新しく考案した逆流を生ずる補助電極付きイオンドラグポンプの特性について述べる。この原理を応用して、正・負の加速電極の中間に、独立した絶縁皮膜付き補助電極を設けたイオンドラグマイ

クロモータを開発した。駆動実験を行った結果、補助電極の電圧極性を切り替えることにより、純電氣的に可逆運転を行うことに成功したのでその結果を報告する⁽¹⁴⁾。

2. 液体流動の原理

図1 液体流動の原理

Fig.1 Principle of liquid Stream

図1に本アクチュエータにおいて応用したイオンドラグ力による液体流動の生ずる原理を示す。同図ではアクチュエータの基本構造として、平面基板上に平板電極を置いた場合の断面図を示している。加圧液体として数10%のブチルアルコールを混入したシリコン油中に電極の片側半分に絶縁バリアが形成された正・負の電極が交互に置かれている。同図において正・負のイオンになりやすい両イオン性物質であるブチルアルコール分子(BA)は、正の電極1の絶縁バリア層(SiO)で保護されていない露出した部分に接すると、電子をとられて正のイオンになる。そして最も近い異極性電極である右隣負電極2に引かれて右方向に加速される。このときイオンは周りの液体を引きずり、流動を起こしながら電極2の左半面(バリア層上)に漂着する。しかしこれらのイオンは、ここでは電荷の交換ができないので、液体の流動などによって電極2の露出部分にたどり着く。そして電荷の中和及び負電荷の付着が行われ負イオンとなり、それらは最も近い異種電極である正電極3に引かれ、再び右方向に加速される。同様の現象が次々と起こり、正・負の電極が交互に置かれている構造にもかかわらず、両イオン性物質は正負のイオンになりながら右の方向に加速されて、液体の流動を生じる。

3. 多段加速電極による液体の流動

ここではまず、上に述べた多段加速の動作原理を確認するために行った金網電極を用いたイオンドラグポンプについての実験結果について述べる。このポンプは図1のような平板電極系ではなく、円形金網電極を用いて図2に示すような円筒形状をしている。0.2 mm径、線間隔1.5 mmのステンレス製の円形網電極と5 mm長に切ったアクリルパイプを交互に重ね多段構造とした。各網電極部はエポキシ樹脂で接着して液漏れを防いでいる。金網の片面には絶縁バリアとしてネガレジスト膜が形成されており、図1同様の非対称電極となっている。電極は全部で6枚となっているが、そのほかに、それぞれ2枚、4枚の加圧電極数でも測定した。ブチルアルコールを20%含むシリコン油を入れたメスシリンダ中にイオンドラグポンプを沈め、電圧を印加したときのポンプ内・外の液面高さの差から発

図2 多段金属網電極を用いたイオンドラグポンプの構造

Fig.2 Structure of ion drag pump with multistaged metal mesh electrode

生圧力を求めた。また、同時に電極電流を測定し記録した。

図3に電極枚数6枚のポンプの発生圧力及び電極電流の印加電界依存性を示す。同図よりポンプの発生圧力は印加

図3 イオンドラグポンプの発生圧力

Fig.3 Generated pressure of ion drag pump

電界のほぼ2乗に比例して増大することがわかる。一方、電極の導電電流は印加電圧にほぼ比例、すなわちオーミックコンダクションに近い領域で流れていることがわかる。しかし、多くのポンプを作成して発生圧力とポンプ電流の電界依存性を調べ、それぞれの電界依存性における電界のべき乗数を求めたところ図4のような結果が得られた。同図より、ポンプ電流は印加電界のほぼ1.2乗に比例しており比例関係に近いが、発生圧力は印加電界のおよそ2から3.5乗に比例していることがわかる。このようになるメカニズムについては現在検討を行なっている。

図5は2個のポンプにおいて図2の加速電極の数を2、4及び6枚としたときの発生圧力を、印加電圧が10 kV同図より電極枚数が増加すると、発生圧力が急激に増大することがわかる。すなわち、加速枚数を増やすことにより、の場合について示したものである。データ数は少ないが、前節に述べたような多段加圧機構が有効に働いていると考えられる。電極枚数が2枚のときの発生圧力は非常に小さ

図4 発生圧力及び電流密度の電界依存性における電界に対するべき乗数の分布

Fig4. Distribution of exponent for electrical field in field effect on pressure and current

図5 発生圧に及ぼす電極枚数の影響
Fig.5 Effect of number of electrode on generated pressure

いが、これは両イオン性物質をイオン種として用いているので、イオンの逆流が生じやすいと思われる。

4. 補助電極付きイオンドラッグポンプ

従来の片側半分を絶縁膜で覆う電極では、絶縁膜で覆う過程で網目が詰まったり裸の部分に絶縁塗料が回り込んで、製作が非常に困難であった。そこでこの電極構造と等価と考えられ、製作が容易である構造として、図6の構造を考案した。図6では電極の半分を覆う代わりに、全体をネガレジスト絶縁皮膜で覆った補助の金網電極を作り、イオン加速用の裸電極と重ねて、加速電極と同電位にしている。イオン加速電極には350μmのステンレスワイヤー製で、線と線の間隔が500μmの網を用い、従来と同様、正・負の電

図6 補助電極付きイオンドラッグポンプの構造

Fig. 6 Structure of ion drag pump with subsidiary electrode

圧を交互に印加している。1mm厚のアクリル樹脂板を用いて図6のように組み立てて加速電極を6枚有する16mm×16mm×19mmの大きさのイオンドラッグポンプを作成した。2枚重ねた電極の最大厚みは1.4mmで、電極間隔は1.6mmである。ポンプの出口と入り口には管を立ててマンオメータを構成し、発生圧力を測定した。また、ポンプの出入り口を内径12mmφの管でつなぎ、内部に浮きを入れ、テレビカメラで観察して流速及び流量を求めた。作動流体としては、前と同様正・負のイオン源であるブチルアルコールを数10%程度混入したシリコン油を用いている。従来の多段加速電極の半分を絶縁皮膜で覆ったイオンドラッグポンプでは、裸の部分で生成したイオンは裸部分にもっとも近い隣の電極の方向すなわち、自極の絶縁皮膜の反対側に向かって移動すると考えられ、その方向に流動が生じた⁽¹⁰⁾ ⁽¹²⁾。しかし図6の補助電極付きのイオンドラッグポンプでは、その逆方向、すなわち裸電極から同電位で自極の一部と考えられる補助電極部に向かって流動した⁽¹³⁾。図7はこのとき

図7 補助電極付きイオンドラッグポンプの発生圧力と電極電流

Fig.7 Generated pressure and electrode current of ion drag pump

の発生圧力及び電極電流と印加電界の関係を示したものである。同図より低電圧域では圧力及び電極電流は印加電圧者とも印加電圧の2乗に比例して増加することがわかる。従って発生圧力は電極電流にほぼ比例していることがわかる。

5. 補助電極による逆流の発生

裸電極と全体を絶縁被膜で覆った等電位にした金網補助電極とを、図6のように重ねた電極を用いたイオンドラッグポンプでは、従来の電極の半分の絶縁皮膜で覆ったものは逆方向に流動が生じた。図8を用いてその原因を説明する。今、負に保たれた中央の電極の近傍を考えると、負電位の補助電極には同図に示すように、裸電極とは逆極性の

図8 補助電極による逆方向への流動
Fig.8 Reverse streaming by subsidiary electrode

+イオンが多く蓄積されると考えられる。従って補助電極と裸電極は接続され、等電位になっているにもかかわらず、補助電極と裸電極の間の電界は非常に強められる。一方、右隣の補助電極は正に保たれており、多くの負電荷が蓄積されるので、裸電極の右側の電界は弱められる。従って中央の裸電極で生成した負イオンの多くは左側へ移動し、従来とは逆の左向きの液体流動が生ずることになる。

このような補助電極をイオン加速電極間の中央に設けて、その印加電圧の極性を反転させれば、上に述べたイオンシースの効果によって加圧方向が反転し、加圧方向が制御可能なポンプの実現が可能と考えられる。現在そのような構造を持つイオンドラッグポンプを試作して加圧実験を進めている。また、同じ原理にもとづく可逆転イオンドラッグモータを試作してこのような現象が生じていることを確かめたので、以下に示す⁽¹⁴⁾。

6. 補助電極付き可逆転型イオンドラッグモータ

図9に製作した逆転可能なイオンドラッグモータの構造を示す。モータの外形は同図(c)に示すように、以前に報告した一方回転形とほぼ同じである⁽¹⁰⁾。シリンダーには内径5mm、外径6mmのテフロンチューブを5mm長に切ったものを使い、ガラス基板上に適量の瞬間接着剤で固定した。同図(a)はスライドガラス上に作られたモータの電極引き出し線を含めて示した全体の概観図で、図(b)は中心部のモータ部分の拡大図である。図(a)には示されていないが同じスライドガラスの左側に鏡対象の構造の

ものがもう一個作られている。同図において+及び-の符号のついている電極が正・負の電圧を印加するイオン加速電極で、±及び干の符号ついている電極は、隣の正・負のイオン加速電極(符号同順)につながるSiO₂絶縁皮膜で覆われた補助電極である。これらの電極は剥がれにくく丈夫なものとするために、真空蒸着法により、Cr(~1nm), Ni(~3nm), Au(~3nm)の3層構造とした。また、電極の幅

図9 補助電極付き可逆転イオンドラッグモータの構造
Fig.9 Structure of reversible ion drag motor with subsidiary electrode

は0.5mmであり、加速電極と補助電極の間隔はおよそ1mmである。被覆絶縁膜のSiO₂も真空蒸着で作られ、3nm程度の厚みを有している。ロータはOHP用フィルムを直径5mm弱の円盤状に切り取り、回転軸を瞬間接着剤で円盤に垂直に固定した。シリンダーの中に30%のブチルアルコールを混入したシリコン油を4mm程度の深さまで注入し、液中にロータを静かに沈めて駆動実験を行った。ロータは最

図10 補助電極付き可逆転イオンドラッグモータの電圧-回転数特性
Fig.10 Speed-voltage characteristics of reversible ion drag motor with subsidiary electrodes

初電極と接触しているが、回転をはじめると浮き上がり、摩擦の問題がなくなってスムーズに回転する。

補助電極をどちら側のイオン加速電極と同極性とするかによって回転方向を制御することが可能である。この補助電極は電荷の注入は行わないが、印加電圧の逆極性のイオンシースを形成することにより、電界の逆転現象を生じさせて、モータの回転方向を逆転させる非常に重要な役目を果たす。

補助電極を反時計方向隣及び時計方向隣のイオン加速電極に接続して、イオンドラッグモータの無負荷回転実験を行った。その結果、補助電極を反時計方向隣の加速電極に接続したとき、モータは時計方向回転をし、時計方向隣の加速電極に接続したときは反時計方向回転をすることがわかった。ブチルアルコール濃度が20から40%のシリコン油で多数回の実験を行ったが、いつもこのような特性を示した。図10に両者における印加電圧と回転数の関係を示す。同図より、いずれの場合も、すでに報告した一方向回転イオンドラッグモータのときと同様⁽¹⁰⁾、ロータの回転数は印加電圧にほぼ比例することがわかる。また、反時計方向回転のときの方が若干回転速度が高いようであるが、回転方向によって回転数はあまり差がないことがわかる。また、電極電流も同時に測定したが、この回転数の差は電極電流の差によるものと考えられた。

正・負のイオン加速電極の中間に絶縁皮膜塗布補助電極を配置したイオンドラッグモータで回転方向が制御できる仕組みを図11のリニアなモデルで説明する。図11の加速電極には従来のモータと同様正・負の電圧が交互にかけられており、絶縁バリアを有する補助電極には左の加速電極

図11 補助電極を左方電極と同極性にした場合

Fig.11 When subsidiary electrodes have the same polarity to left accelerating electrode

と同じ極性、例えば最も左側の補助電極には+の電圧が印加されている。補助電極には絶縁バリアが設けられており、電荷の交換ができないので逆極性の負電荷が蓄積される。従って補助電極の左方の電界が非常に大きくなり、図中の矢印で示されるような強いイオンの流動が起きて液体もドラッグ力によってその方向に流動する。加速電極の左方の電界は弱められるので左方向の流動は小さく、全体として液体は右方向に流動することになる。

一方、加速電極に図11と同じ極性の電圧が印加されている場合でも、絶縁バリアを持つ補助電極に右方の加速電

極と同じ極性、例えば最も左方の補助電極に-の電圧が印加されているときは、逆極性の正イオンが蓄積されるので、補助電極の右方の電界が強められ、同じ原理で、図11の矢印の方向とは逆の方向に液体の流動が生じることになる。すなわち、補助電極の極性を切り替えることにより、液体流動の方向を逆転させることができ、モータの回転方向も逆転させることが可能である。

7. まとめ

電極の片側を絶縁皮膜で覆った場合、正・負電圧を印加した電極を交互に配置した電極系でも、液体が有効的に多段加圧されることが確認できた。また、電極の半分の絶縁皮膜で覆った補助電極を設けた新しいタイプのイオンドラッグポンプを考案した。その結果このポンプは従来のイオンドラッグポンプとは逆の方向に加圧されることがわかった。そこで、この逆転原理を応用した補助電極を有する回転型のイオンドラッグマイクロモータを開発した。その結果、補助電極の極性を変えることによって、従来この種のモータでは困難であった正転・逆転制御が純電氣的にできることがわかった。現在同様の構造をイオンドラッグポンプにも採用して加圧方向を変えることのできるポンプを開発中である。

最後に本研究は文部省科学研究補助金(07650069)及びマイクロマシンセンターの研究補助金を受けたものであることを記し謝意を表します。また本研究を進めるに当たって実験を行ってくれた愛知工業大学卒研生岡村浩之君及び長妻博君に感謝いたします。

(平成10年4月22日受付、平成10年10月1日再受付)

文献

- (1) 特集；マイクロマシン、電気学会雑誌 No.1 Vol.117 1998
- (2) 内野研二 他編 精密制御用ニューアクチュエータ便覧、フジ・テクノシステム、1995
- (3) PARK J-H, YOSHIDA K., YOKOTA S., "Piezoelectric micro pump using resonance drive: Proposal of resonance drive and basic experiment", ASME FPST, Vol.4 pp.77-82, 1997
- (4) M.Stehr, S.Messner, H.Sandmaier, R.Zengerle, "A NEW MICRO PUMP WITH BIDIRECTIONAL FLUID TRANSPORT AND SELFBLOCKING EFFECT, IEEE Workshop on MEMS pp. 485-490, 1996
- (5) A.Richter, A.Plettner, K.A.Hofmann, H.Sandmaier, "ELECTROHYDRODYNAMIC PUMPING AND FLOW MEASUREMENT", IEEE Workshop on MEMS, pp.271-276, 1991
- (6) Si-H.Ahn, Y.-K. Kim, "Fabrication and Experiment of Planar Micro Ion Drag Pump", 電学論E Vol.118, No.5, pp.255-259, 1998
- (7) MUELLER T, SCHNELLE T, HAGEDORN R, FUHR G, "A

Traveling-wave micropump for aqueous solutions: Comparison of 1 g and μ g results", Electro-phoresis, Vol.14, No.8, pp.764-772, 1993

- (8) YANG S S, YANG E H, YOO S H, KIM S Y, SEO J D, "fabrication of electrostatic actuator and passive valves with p+ diaphragms for micropumps", ASME DSC, Vol.55, No. Vol 2, pp.733-740, 1994
- (9) J.Ji, L.J.Chaney, et.al,"MICROACTUATION BASED ON THERMALLY-DRIVEN PHASE CHANGE", Transducer' 91, pp.1037-1040
- (10) 土田、大澤、他"イオンdrag力によるEHD流を応用したDCマイクロモータの研究"、電学論D Vol.113, No.12, pp.1442-1448 1993
- (11) 土田、大澤、他、"イオンドラッグ力を応用したマイクロソーラポートの開発"、電学論C、Vol.116, No.1, pp.43-48, 1996
- (12) 牧内、土田、大澤、大橋、"イオンドラッグマイクロポンプの試作"、電気関係学会東海支部連大講演論文集、425、1995
- (13) 牧内、土田、大澤、大橋、"試作イオンドラッグマイクロポンプの動作"、電気学会全国大会、Vol.4, 1996, 1996
- (14) 長妻、土田、大橋、"補助電極付き可逆転型イオンドラッグマイクロモータの研究"、電気関係学会東海支部連大講演論文集、383、1997

土田縫夫 (正員) 昭和47年名古屋大学大学院博士課程満了。

了。同大学助手、豊田工業大学助教授を経て平成4年同大学教授。工学博士。アクチュエータ、センサ、液体誘電体物性及びその応用研究に従事。電気学会論文賞授賞。電子情報通信学会、静電気学会、及びマイクロマシン研究会会員。

牧内弘和 (非会員) 平成7年愛知工業大学電気工学科卒業、

平成9年同大学大学院修士課程電気工学専攻修了、同年名古屋電機産業株式会社(NSD)入社現在に至る

大澤 潤 (非会員) 昭和48年名古屋大学工学部電子工学科

卒業。53年同大学院博士課程電気・電子専攻満了。同年三菱電機(株)入社。LSI研究所にて半導体光デバイスの研究に従事。60年豊田工業大学助教授。主として、ガリウム・砒素系材料のプロセス・デバイスの研究に従事。工学博士。

大橋朝夫 (正会員) 昭和13年12月1日生。昭和45年名

古屋大学大学院工学研究科博士課程満了。同年同大学助手、その後、講師、助教授を経て、昭和60年愛知工業大学教授、現在に至る。工学博士。静電気学会会員。