

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 27 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360073

研究課題名(和文) 交流電気浸透流を用いたマイクロアクチュエーションシステムの開発

研究課題名(英文) Development of micro actuation systems using ac electroosmotic flows

研究代表者

吉田 和弘 (Yoshida, Kazuhiro)

東京工業大学・精密工学研究所・准教授

研究者番号：00220632

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,700,000円、(間接経費) 4,410,000円

研究成果の概要(和文)：交流電気浸透は、単純な構造の固定電極による比較的低い交流電圧の印加により水などの液体の対流を発生することができる優れた特性を有し、その対流を一方向の流れに変換できれば、高機能なマイクロアクチュエーションシステムを実現することができる。そこで本研究課題では、偏流板、四角柱-スリット電極、および平板-細管電極を用いた、交流電気浸透により一方向の流れを生じる3種類のマイクロポンプを提案し、有限要素法により特性解析を行うとともに、MEMSプロセスを開発して各ポンプを試作し、それらの特性を実験的に評価し、有効性を確認した。

研究成果の概要(英文)：The ac electroosmosis (ACEO) produces convection flows of water by applying relatively low ac voltage to the liquid through simple fixed electrodes. By obtaining a unidirectional flow from the ACEO convection flow, advanced micro actuation systems will be realized. In this study, to realize above-mentioned function, three micropumps using flow deflectors, square pole-slit electrodes, and plate-small pipe electrodes were proposed and developed. Based on the FEM simulation, the performances of micropumps were theoretically evaluated. Then the MEMS processes were developed and the micropumps were fabricated. Through experiments, the characteristics of micropumps were clarified and their validity was confirmed.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：先端機能デバイス マイクロ・ナノデバイス アクチュエータ 電気浸透 MEMS 機械力学・制御 マイクロポンプ 流体

1. 研究開始当初の背景

固定電極により水などの液体に交流電圧を印加すると、帯電粒子が電界により加速され、電極表面でゼータ電位に依存するすべり速度の流れを生じ、それが粘性により流路全体に伝播され対流が発生する。交流電圧の符号が反転すると、電極表面に集合している電荷の符号も反転するため、すべり速度の向きは変化せず、継続的な対流が生じる。このような現象は交流電気浸透(AC electroosmosis, 以下、ACEO)と呼ばれる。

ACEO は、1) 固定電極から成る単純な構造で、低い電圧により、液体の対流を発生させることができる、2) 電気分解を抑制でき、高電圧化により高出力化することができる、3) 多くの種類の誘電性液体を駆動することができる可能性がある、などの優れた特長を有している。発生する対流を一方向の流れに変換することができれば、マイクロアクチュエータ、液体および固体微粒子のマイクロ混合、分離システムなど、高機能なマイクロアクチュエーションシステムに応用できると考えられる。

ACEO については、以下のような理論的説明および応用の研究が行われていた。

(1) メカニズムの理論的説明：

ゼータ電位が低い場合の線形数学モデルはすでに確立されており、ゼータ電位が高い場合の非線形数学モデルの研究が進められていた(参考文献：G. Soni、Nonlinear Phenomena in Induced Charge Electroosmosis, 米国カリフォルニア大学サンタバーバラ校学位論文、(2008))。

(2) 交流電気浸透による対流の応用研究：

μ TAS (微小化学分析システム)、Lab-on-a-chip のマイクロポンプ、マイクロミキサーへの応用研究が進められていた(参考文献：同上)。

(3) 交流電気浸透による対流を一方向の流れに変換するメカニズムの開発：

以下の手法により、対流を非対称とし差分を取り出す手法が提案、検討されていた。

第 3 のゲート電極を用いる手法(参考文献：同上)。

幅が異なる電極を用いる手法(参考文献：T.S. Hansen, K. West, O. Hassager, N.B. Larsen, An All-Polymer Micropump Based on the Conductive Polymer Poly(3,4-Ethylenedioxythiophene) and a Polyurethane Channel System, J. of Micromechanics and Microengineering, Vol. 17, (2007), pp. 860-866)。

高さが異なる電極を用いる手法(参考文献：J.P. Urbanski, J.A. Levitan, D.N. Burch, T. Thorsen, M. Z. Bazant, The Effect of Step Height on the

Performance of Three-Dimensional AC Electro-Osmotic Microfluidic Pumps, J. of Colloid and Interface Science, Vol. 309, (2007), pp. 332-341)。

進行波電圧を用いる手法(参考文献：K. Xie, Y. Lai, X. Guo and R.J. Campbell, A three phase serpentine micro electrode array for AC electroosmotic flow pumping, Microsystems Technologies, Vol. 16, No. 10 (2010), pp. 1825-1830)。

しかし、これらの手法は ACEO で生じる対流の一部を取り出す手法であるため、流れを十分に活用することはできていなかった。

2. 研究の目的

ACEO により、空間的に一方向の流動を効率的に発生させることができれば、前述の特長を活かした、優れたマイクロアクチュエーションシステムを実現できると考えられる。

そこで本研究課題では、ACEO による流動を空間的に一方向とする新たな手法を考案し、前述の特長を活かしたマイクロポンプを実現する。これにより、マイクロアクチュエータ、液体および固体微粒子のマイクロ混合、分離システムなど、高機能なマイクロアクチュエーションシステム実現のための基礎技術を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究課題では、ACEO により一方向の流れを得るため、対流を偏流板により一方向流れに変換する手法、表面が直交するように配置した電極により電界の電極表面への入射角度を変え一方の電極表面のみですべり速度を生じさせ一方向流れを得る手法、の二つの手法を考案し、それぞれについて、有限要素法(FEM)シミュレーションおよび試作機の実験により特性を検討した。具体的には、

- (1) 偏流板を用いたマイクロポンプの提案、試作および特性評価
- (2) 四角柱 - スリット電極を用いたマイクロポンプの提案、試作および特性評価
- (3) 平板 - 細管電極を用いたマイクロポンプの提案、試作および特性評価を行った。

4. 研究成果

- (1) 偏流板を用いたマイクロポンプの提案、試作および特性評価：

図 1 に示すように、3 個の平行に配置された長方形電極により生じる各電極の中心軸方向へのすべり速度を偏流板に当て、直交する共通の上方向に流れを生じさせる構造を提案、本構造のマイクロポンプを試作し、その特性について評価した。

図 2 に示す MEMS プロセスを開発して試作したデバイスの流路主要部の大きさは $1 \times (0.03 \sim 0.1) \times 0.06 \text{ mm}^3$ である。脱イオン水

を作用流体として流速を測定し、その結果を基に FEM ソフトウェアによる流体工学シミュレーションにより吐出流量を求めた。以上の検討を偏流板の形状およびサイズ、流路および電極のサイズ、および作用流体の種類を変えながら行い、本デバイスの最適構造を明らかにした。結果の一例として、入口ポートの幅 W_i に対するポンプ有効体積当りの吐出流量を図 3 に示す。

なお、本研究成果は日本機械学会 2011 年度年次大会において発表した(学会発表)

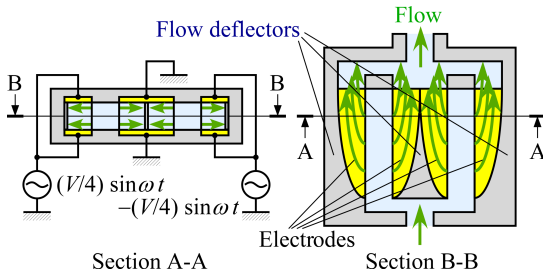


図 1 偏流板を用いたポンプ

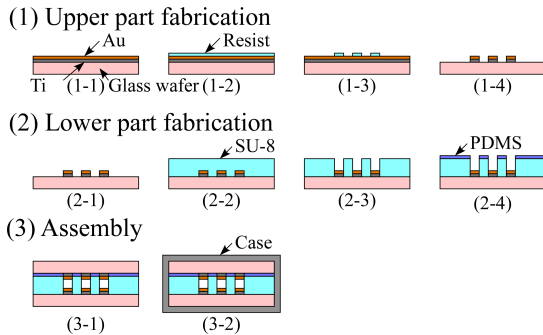


図 2 偏流板を用いたポンプの MEMS プロセス

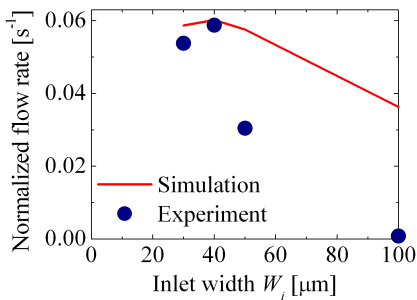


図 3 偏流板を用いたポンプの吐出流量

(2) 四角柱 - スリット電極を用いた ACEO マイクロポンプの提案、試作および特性評価:

図 4 のように、四角柱電極とスリット電極を対抗配置した構造で、スリット電極表面のみですべり速度を発生させ一方流れを得る ACEO マイクロポンプを提案し、FEM シミュレーションによりその特性の検討を行った。ACEO の既存の数学モデルに基づき、FEM ソフトウェアを用いて吐出流量が最大となる四角柱電極およびスリット電極の大

きさおよびそれらの間隔の値を明らかにした。一例として、スリットの幅 W_s に対するスリット出口の流速のシミュレーション結果を図 5 の実線で示す。

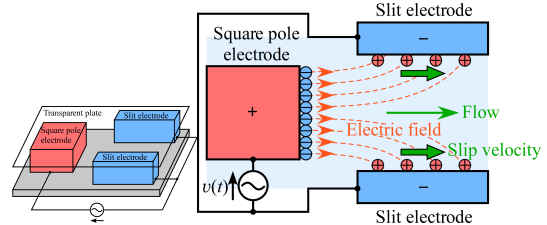


図 4 四角柱 - スリット電極を用いたポンプ

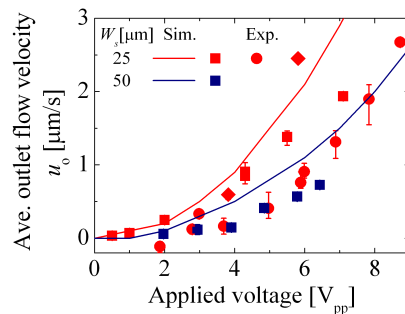


図 5 四角柱 - スリット電極を用いたポンプの流速

次に、四角柱 - スリット電極を用いたポンプを図 6 に示す MEMS プロセスを開発して試作し、実験的に特性評価を行った。各部寸法の流速に及ぼす影響を明らかにするとともに、FEM 解析に基づく結果との比較を通してその有効性を示した(図 5 参照)。図 7 に示す四角柱電極 1 個およびスリット電極 2 個から成る長さ 0.2 mm、幅 0.2 mm、高さ 0.05 mm のユニットに対し、振幅 26 V_{pp}、周波数 100 Hz の交流電圧を脱イオン水に印加したところ、最大流速 1.6 mm/s が得られた。

なお、本研究成果は、日本機械学会山梨講演会(学会発表)、日本 AEM 学会 MAGDA コンファレンス(学会発表)、国際会議 ICMDT2013(学会発表)および国際会議 ICMT2013(学会発表)において発表した。

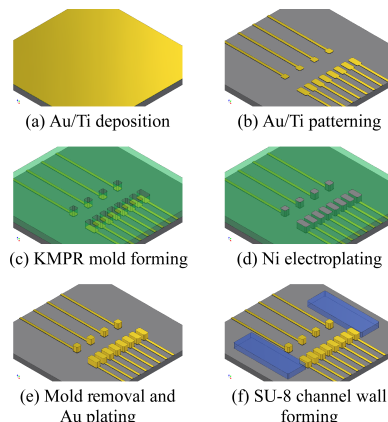


図 6 四角柱 - スリット電極を用いたポンプの MEMS プロセス

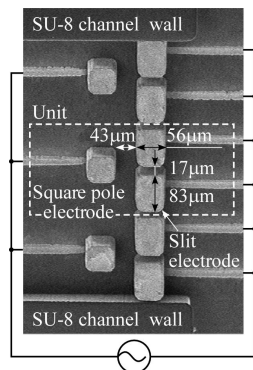


図7 四角柱 - スリット電極を用いた試作ポンプの例

(3) 平板 - 細管電極を用いたマイクロポンプの提案、試作および特性評価：

(2)の2.5次元構造のポンプを3次元構造に発展させ高出力化を図った、図8に示す平板 - 細管電極を用いたポンプを提案し、その特性についてFEM解析を行い、最適設計を行った。その結果、細管の直径は小さいほど高出力が得られ、しかも直径が小さくなるほど急激に性能が向上することが確認された。また、平板 - 細管電極を並列配置し流量の増大を図り、さらに直列配置により高圧化を図れる、図9に示す集積化ポンプを提案し、直径1µmという極めて小さい直径の孔を有する平板電極を試作することにした。その前段階として、直径10µmの孔が間隔40µmで配置された厚さ30µmの平板をMEMSプロセスを開発して試作した。さらに、平板電極と組み合わせ、集積化ポンプを構築し、その動作を確認した。

本成果は、日本機械学会 2014 年度年次大会で発表予定である。

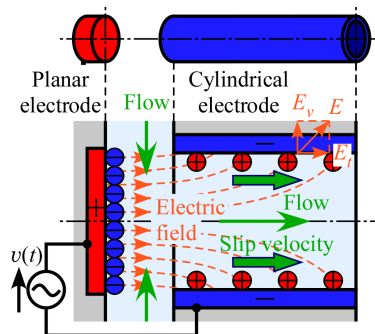


図8 平板 - 細管電極を用いたポンプ

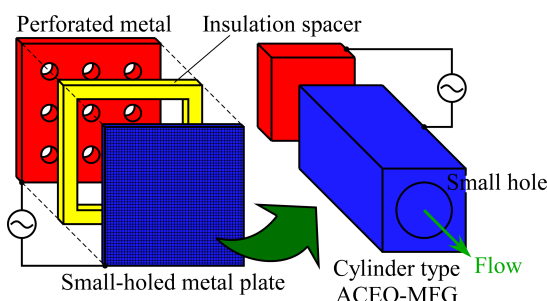


図9 平板 - 細管電極を用いた集積化ポンプ

以上のように本研究課題では、偏流板、四角柱 - スリット電極、および平板 - 細管電極を用いた ACEO マイクロポンプを提案、開発し、高性能なマイクロアクチュエーションシステム実現のための基礎技術を確立した。

5 . 主な発表論文等

〔学会発表〕(計6件)

吉田和弘、平板 - 円筒電極を用いた交流電気浸透マイクロポンプの提案、日本機械学会 2014 年度年次大会、2014 年 9 月 (発表予定) 東京

吉田和弘、Development of an AC Electroosmotic Micropump Using Square Pole - Slit Electrodes、17th Int. Conf. on Mechatronics Technology (ICMT2013)、2013 年 10 月 17 日、韓国 済州島

吉田和弘、An AC Electroosmotic Micropump Using Square Pole-Slit Electrodes、5th Int. Conf. on Manufacturing, Machine Design and Tribology (ICMDT2013)、2013 年 5 月 24 日、韓国釜山

吉田和弘、スリット - 直方体電極対を用いた交流電気浸透マイクロポンプ、第 21 回 MAGDA コンファレンス in 仙台、2012 年 11 月 22 日、仙台

吉田和弘、スリット - 直方体電極対を用いた交流電気浸透マイクロポンプの特性評価、日本機械学会山梨講演会、2012 年 10 月 27 日、甲府

吉田和弘、偏流板を用いた交流電気浸透マイクロポンプ、日本機械学会 2011 年度年次大会、2011 年 9 月 13 日、東京

〔その他〕

ホームページ等

http://yokota-www.pi.titech.ac.jp/yokota_lab/top.html

6 . 研究組織

(1)研究代表者

吉田 和弘 (YOSHIDA, Kazuhiro)
東京工業大学・精密工学研究所・准教授
研究者番号：00220632

(2)研究分担者

横田 眞一 (YOKOTA, Shinichi)
東京工業大学・精密工学研究所・教授
研究者番号：10092579

金 俊完 (KIM, Joon-Wan)
東京工業大学・精密工学研究所・准教授
研究者番号：40401517

巖 祥仁 (EOM, Sang In)
東京工業大学・精密工学研究所・助教
研究者番号：20551576