

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24246030

研究課題名(和文) 機能性流体 ECF を用いた高出力パワー密度マイクロ液圧源

研究課題名(英文) Micro hydraulic power sources having high output power density using electro-conjugate fluid (ECF)

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,300,000 円

研究成果の概要(和文)：安価で大量生産が可能であると同時に、世界一の高出力パワー密度を有するマイクロ液圧源を実現するために、直流電圧の印加により電極間に活発な流れが発生する電界共役流体(ECF)の駆動原理とマイクロマシン(MEMS)の加工技術を融合した新たなマイクロ液圧源を開発した。高出力パワー密度のマイクロ液圧源の特性評価を行ない、電子チップの冷却、小形なソフトアクチュエータなどの具体的な応用例に適用することによって、その有効性を確認した。

研究成果の概要(英文)：An electro-conjugate fluid (ECF) is a kind of functional fluid. A strong and active jet flow of ECF can be generated between electrodes surrounded by ECF, when high DC voltage is applied to the electrodes. In order to realize the micro hydraulic pressure source having the highest output power density in the world, we integrated the ECF jet effect as a driving mechanism and MEMS technology as its fabrication. We investigated the characteristics of the ECF micro hydraulic sources. Based on the characteristic evaluation, we applied our ECF micropumps to the cooling electronic chips and various tiny soft actuators. The study proved that ECF micro hydraulic power sources are very effective.

研究分野：工学

キーワード：マイクロ液圧源 電界共役流体 MEMS マイクロポンプ

1. 研究開始当初の背景

物理的な性質とその寸法効果から、(a)フルードパワーアクチュエータは大きいサイズで高出力パワーが必要とする分野で、(b)電磁アクチュエータなどは広い範囲で汎用として、(c)静電、圧電アクチュエータは高分解、超精密マイクロシステムで使用される。その結果、マイクロサイズで高出力パワーを有するアクチュエータは今までに存在しない。この条件を満たすアクチュエータは、高出力パワーを得意とするフルードパワーアクチュエータのマイクロ化で原理的には実現できるが、機械的な摺動部・駆動部があるポンプの小形化が困難なことから、その実現は簡易ではない。一例として、100W以上の発熱量をもつCPUの液冷の場合、100kPa以上の発生圧力とともに数十 ml/min以上の流量が必要であるが、Smitsらが1980年代に始めてMEMS技術を用いたマイクロポンプを発表して以来、マイクロポンプについて報告された200件以上の論文の内、この条件をクリアした研究は存在しない。

2. 研究の目的

世界一の高出力パワー密度を有するマイクロ液圧源の実現を目的とし、電界共役流体(Electro-Conjugate Fluid: ECF)に着目している。ECFとは、その中に挿入された電極対に直流電圧を印加することで電極間に活発なジェット流を発生させる機能性流体である。このECFジェットは、微細な電極対と液体(ECF)のみで発生可能であり、機械的な摺動部・可動部がないため、今まで難しかったフルードパワーアクチュエータのマイクロ化が実現できる。また、ECFジェットは電極対の寸法が小さくなるほど、パワー密度が大きくなるのが過去の研究で実験的に確認されていることから、高出力パワー密度を有するマイクロポンプに適している。我々は高出力パワーとMEMS加工を両立させるため、針-リング形電極対に近い形状で、高アスペクト比をもつ三角柱-スリット形電極対を提案した。MEMS技術により製作した三角柱-スリット形電極対を用いたECFマイクロポンプでは、19 kPaの吐出圧力と1.7 ml/minの吐出流量が得られて、世界トップレベルのマイクロポンプの出力パワー密度(3kW/m³)より優れた性能(20kW/m³)が確認された。しかし、例えば100WのCPUの冷却にはさらなる高出力パワー密度が求められる。これまでの優れた研究成果のさらなる発展として、本研究の目的はMEMS技術を用いて世界一の高出力パワー密度を有するマイクロ液圧源を開発し、その具体的な応用例に適用することによって、その有効性を示すことである。

3. 研究の方法

(1)ECFジェットの流動メカニズムの解明

申請者は、電極対に直流電圧を印加するこ

とで電極間に活発なジェット流を発生させる新たな物理現象を世界で初めて発見し、この機能性流体(ECF)とその現象(ECFジェット)について日本、アメリカ、欧州連合で特許を取得している。世界一の高出力パワー密度のマイクロ液圧源を実現するには、ECFジェットの流動メカニズムを明確にしたうえで、このメカニズムを考慮して高度な設計をする必要がある。関連分野の徹底的な文献調査とその内容を熟知したうえで、この現象を説明できると思われる新たな流動モデルを構築して、シミュレーションと実験により流動モデルを証明する。シミュレーションには異なった学問分野にまたがるモデルの有限要素解析に適しているComsol社のMultiphysicsを用いる。

(2)ECF電極形状の検討によるマイクロ液圧源の最適化

MEMS技術により製作した三角柱-スリット形電極対で主要パラメータの最適化を実施する。また、TPSEのさらなるマイクロ化によるECF効果を評価するために、TPSEのユニットサイズは今までと同サイズで主要寸法パラメータのみを微小化する「類似マイクロTPSE」を提案、製作し、その特性評価を行う。

(3)三角柱-スリット形電極対の直列・並列化による集積化

吐出圧力はECF電極対の直列化により、吐出流量は並列化により比例して増加することが明らかになった。三角柱-スリット形電極対を直接・並列に集積化することで高出力パワーのマイクロ液圧源を実現する。100%の歩留まりで多数の電極対を平面に集積することが求められて、その具体的な工夫として、残留応力が少ないメッキ条件を確立するとともに、各プロセス後に電極の密着性を高めるための表面処理を行う。平面集積化が完成したら、さらなる高出力パワーを達成させるために三次元立体集積化を行う。立体集積化は電極製作のMEMSプロセスを多層で繰返して形成することで原理的には可能である。

(4)電極対の密度を向上させる新たなMEMSプロセスの開発

三角柱-スリット形電極対を用いたECFジェットの可視化により、三角柱の先端部のみがジェット発生に大きく関与していることが明らかになった。したがって、電極高さを維持しながら電極の断面積を小さくすることで、単位面積当たりの電極対の数を増やすことができ、電極1対あたりの出力パワーは大きく変わらないと仮定すると、高密度電極対による高出力パワー密度が実現できる。厚膜レジストと電解メッキによるMEMSプロセスでは2~3程度のアスペクト比が製作の限界であるため、新たに工夫したMEMSプロセスを提案する。(a)深堀反応性イオンエッチング(Deep RIE)を用いてシリコン電極対の作製する。アスペクト比100以上のものも原理的に可能であるため、電極対の密度を高めることができる。

(5) マイクロ液圧源の具体的な応用

本研究はフルードパワーのマイクロ化でメリットを有するすべての分野への応用が広がる基礎的研究であり、開発されたマイクロ液圧源を実際のアプリケーションへ適用することでマイクロ液圧源の有効性を証明する。まず、最初のアプリケーションとして、電子チップの強制液体冷却に適用する。次の応用として ECF マイクロレートジャイロの開発であり、ECF マイクロ液圧源から発生された噴流がコリオリ力による偏流を検出することで角速度を測るセンサである。ECF マイクロ液圧源の発生圧力を利用するアプリケーションとしてマイクロハンド、マイクロマニピュレータ、点字表示器などがある。小形なソフトアクチュエータでは、より大きい力と変位を得るためには高出力パワー密度のマイクロ液圧源が不可欠である。このマイクロ液圧源の実現で今までに例のないマイクロソフトアクチュエータができる。

4. 研究成果

(1) ECF ジェットの流動メカニズム

ECF ジェットを予測することを目的として、オンサガー効果を導入した ECF ジェットの数学モデルを提案した。オンサガー効果とは誘電性液体の導電率が電界強度に対して増加する現象である。この効果を導入することにより液体中に空間的な導電率の勾配が生じる。その結果、液体中の電荷分布が変化し、流体粒子にクーロン力による体積力が発生することで流動が生じる。実験的に求めた値を提案した数学モデルに取り入れ ECF ジェットによる流速の数値シミュレーションを行った。シミュレーション結果を検証するために、シミュレーションのモデルと同形状の ECF マイクロデバイスを MEMS プロセスにより製作し、可視化実験による流速計測を行った。実験結果とシミュレーション結果を比較すると、ECF ジェットの流速値は印加電圧 1.0[kV]まで概ね一致した。さらに同研究で製作、評価された ECF マイクロデバイス(三角柱-スリット電極対直列 10×並列 3 対)をモデルとしたシミュレーションを行い、圧力、流量について実験結果とシミュレーション結果を比較した。その結果圧力について、印加電圧 1.0[kV]まで結果が概ね一致した。

(2) ECF 電極形状の最適化

TPSE の微小化を実現するには、新しいプロセスの考案とその加工条件を設けるための努力と時間が必要であり、さらなるマイクロ TPSE の効果をすぐ調べることができない背景から、主要パラメータは微小化したもののアスペクト比は変わらない「類似マイクロ TPSE」を提案した。MEMS 技術を用いて、提案した電極対、50、100、200 マイクロメートルデバイスの製作に成功した。これらの電極対を用いて、ECF ジェットの発生圧力を測定し、TPSE の微小化にともない ECF ジェットの発生圧力は向上することが明確になった。特に、

50 マイクロメートルデバイスでは低電圧から高圧力を得ているため、低電圧駆動の長所も確認された。

(3) TPSE の集積化による高出力化

MEMS 技術により製作可能な TPSE を直列・並列方向に集積する二次元集積を行うことで、ECF マイクロポンプとしての性能向上に成功し、 150 kW/m^3 の最大出力パワー密度を達成した。さらなるポンプの出力パワー向上のため、TPSE を三次元的に集積することを提案した。提案する三次元集積の方法は、二次元集積した ECF マイクロポンプを積層していくデバイス積層化(MDS)と TPSE の高さを高くしていく高アスペクト化(HAR)の二通りである。MDS プロセスにおいては、上部に積層するポンプのガラスウェハ上に NC 加工により穴を開け、下部のポンプと接続することで行う。製作の結果、高さ 500 μm の TPSE を直列 10 対×並列 3 対×2 層集積することに成功した。HAR プロセスでは、一層目の Ni 電鍍を施し TPSE の形状を製作したのち、一層目上面の研削を行い、その上に二層目の鍍型を積層し Ni 電鍍を行うことで製作する。製作の結果、高さ 880 μm の TPSE を直列 10 対×並列 3 対集積することを実現した。特性実験の結果、製作した三次元集積 ECF マイクロポンプ(HAR)の最大出力パワー密度は、3.0 kV 印加時に 233 kW/m^3 を達成し、最大出力パワー密度の向上を達成できることを確認した。

(4) 電極対の密度を向上させる新たな MEMS プロセスの開発

Deep Reactive Ion Etching (DRIE) を用いて Si ウェハを直接エッチングし、TPSE を製作することで高アスペクト比の Si 電極対を高パワー密度の ECF マイクロポンプとして用いることを提案した。DRIE を用いて製作された三角柱電極の先端の丸みは 2.5 μm となり、電鍍プロセスで製作されたものの 0.15 倍と鋭利に製作することができた。これにより、DRIE を用いて製作された ECF マイクロポンプにおいて電鍍のプロセスにより制作された ECF マイクロポンプの発生圧力を上回る結果となった。発生流量について DRIE を用いて製作された ECF マイクロポンプ同士で比較を行うと、4.0kV 印加時において電極高さ 0.5mm の ECF マイクロポンプは電極高さ 0.38mm の 1.4 倍の発生流量であった。電極高さは 1.3 倍であることから電極高さの増加分以上に流量が増加する結果となり、TPSE のアスペクト比上昇が出力パワー密度の上昇に重要であることが確かめられた。

(5) マイクロ液圧源の具体的な応用

ECF マイクロポンプの出力の向上を目的とし、上部を三角柱、下部をスリットと見立てた五角柱電極をアレイ状に配置する五角柱電極アレイ (PPEA) を提案した。五角柱電極をアレイ状に配置することで、連続的なジェット流の発生を促進し、TPSE に存在する無駄な空間を削除することが可能である。そのため、流量や高密度化に優れ、ECF マイクロポ

ンプの小形化に有利であるという特長がある。特性実験の結果、製作した PPEA を用いた ECF マイクロポンプは、3.0kV 印加時に 151kW/m³ を達成し、最大出力パワー密度を向上できることが確認した。また、提案した PPEA を CPU の強制液冷システムに応用し、直列 10 対並列 15 対の ECF マイクロポンプを製作した。それは体積 1.9cm³ と大幅な小形化に成功し、3.0kV 印加した際に FF-909EHA2 を 6kPa 負荷時に 560mm³/s の流量を得た。これを流体パワー源として模擬 CPU の冷却実験を行ったところ、模擬 CPU への供給電力 10W~80W に対し、模擬 CPU 表面温度を 100 以下に維持できた。

また、HAR プロセスにより高さ 880 μm の TPSE を製作した ECF マイクロレートジェイロを実現した。実験を行い、特性を評価した結果、センシング精度の指標である、スケールファクターが 400 V 印加時に 1.7 mV/°/s、250 V 印加時に 1.6 mV/°/s と、従来と同程度の精度を維持しながら、低電圧化を達成できることを確認した。

高出力マイクロ液圧ソフトアクチュエータを駆動するため、新たな電極対の並び、電極対形状の工夫、電極対の微小化および流路形状の工夫といった高密度集積化を行ない、10×10×1mm³ の十分小さい ECF マイクロポンプにおいて、1.5kV 印加で 400 kPa の高い発生圧力をはじめて実現した。この結果から高出力パワー密度化とともに駆動電圧の低電圧化ができたことを明確にした。偏心チューブソフトマイクロアクチュエータについて発生力および変位の測定実験を行ない、ECF マイクロポンプでの駆動に適した寸法および物性値を決定し、圧力 0.3MPa 印加で目標値以上の 11mN の発生力を得た。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 8 件)

Shinichi Yokota, A Review on micropumps from the viewpoint of volumetric power density, Mechanical Engineering Reviews, Vol.1, 2014, pp.1-11, 査読有,

(DOI: 10.1299/mer.2014dsm0014)

小林 紀穂, 倉科 佑太, 竹村 研治郎, 横田 眞一, 枝村 一弥, 電界共役流体を用いた Droplet μTAS のための液滴混合デバイスの開発, 日本機械学会論文集 Vol.80, 2014, pp. MN0332, 査読有,

(DOI: 10.1299/transjsme.2014mn0332)

Shohei Ueno, Kenjiro Takemura, Shinichi Yokota, Kazuya Edamura, Micro Inchworm Robot using Electro-conjugate Fluid, Sensors & Actuators:A. Physical, Vol.216, 2014, PP.36-42, 査読有,

(DOI:10.1016/j.sna.2014.04.032)

Yoko Abe, Kenjiro Takemura, Shinichi Yokota, Kazuya Edamura, Droplet μTAS using Electro-conjugate Fluid - feedback position control of multiple droplets in flow channel matrix, Sensors & Actuators:A. Physical, Vol.198, 2013, pp.1-7, 査読有,

(DOI:10.1016/j.sna.2013.04.017)

Yoko Abe, Kenjiro Takemura, Shinichi Yokota, Kazuya Edamura, Active Flow Channel Matrix using Electro-conjugate Fluid for μTAS application, JFPS International Journal of Fluid Power System, Vol.5, 2012, pp.11-15, 査読有,

(DOI:10.5739/jfpsij.5.11)

Joon-wan Kim, Takashi Yoshimoto, Shinichi Yokota, K. Edamura, Concept of a Focus-Tunable ECF Microlens and Fabrication of a Large Model Prototype, The International Journal of Automation Technology (IJAT), Vol.6, 2012, pp.476-481, 査読有,

(http://www.fujipress.jp/IJAT/IJAT E00060004.html)

Kento Mori, Akihiro Yamaguchi, Kenjiro Takemura, Shinichi Yokota, Kazuya Edamura, Control of a Novel Flexible Finger using Electro-conjugate Fluid with Built-in Angle Sensor, Sensors & Actuators:A. Physical, Vol.183, 2012, pp.75-83, 査読有,

(DOI: 10.1016/j.sna.2012.04.028)

Akihiro Yamaguchi, Kenjiro Takemura, Shinichi Yokota, Kazuya Edamura, A Robot Hand Using Electro-conjugate Fluid, Grasping experiment with balloon actuators inducing a palm motion of robot hand, Sensors & Actuators:A. Physical, Vol.174, 2012, pp.181-188, 査読有,

(DOI:10.1016/j.sna.2011.06.002)

[学会発表](計 54 件)

Hongri GU, Joon-wan KIM, Shinichi YOKOTA, Kazuya EDAMURA, 3-TRIANGULAR PRISM ELECTRODES DESIGN FOR ELECTRO-CONJUGATE FLUID MICROPUMP, the 9th JFPS International Symposium on Fluid Power Matsue 2014, 2014/10/28, Matsue city, Shimane, 査読有

金俊完, 三栗野功大, 横田眞一, 枝村一弥, MEMS 技術による五角柱電極アレイ形 ECF マイクロポンプ, 日本機械学会山梨講演会 2014, 2014/10/15, 山梨大学(山梨県), 査読無

古木星哉, 金俊完, 横田眞一, 枝村一弥, MEMS 技術を用いた集積化による ECF マ

イクロポンプの高圧化, 日本機械学会山梨講演会 2014 2014/10/15 ,山梨大学(山梨県), 査読無

田邊勇典, 金俊完, 横田眞一, 枝村一弥, オンサガー効果による ECF ジェットのシミュレーション, 日本機械学会山梨講演会 2014 2014/10/15 ,山梨大学(山梨県), 査読無

Joon-wan Kim, Shinichi Yokota, Masaya Satoh, Kazuya Edamura, ECF MICROPUMP-INTEGRATED MICRO HAND BY MEMS TECHNOLOGY, Bath/ASME symposium on fluid power and motion control (FPMC 2014), 2014/09/10, Bath, UK, 査読有

Joon-wan Kim, Koudai Mikurino, Shinichi Yokota, Kazuya Edamura, ECF Micro Hydraulic Power Source by MEMS-Fabricated Pentagonal Prism Electrode Arrays, World Automation Congress 2014 (WAC2014), 2014/08/03, Hawaii, USA, 査読有

GU Hongri, 金俊完, 横田眞一, 枝村一弥, 三角柱-テーパースリット電極対を用いた ECF マイクロポンプ, 第 14 回日本機械学会機素潤滑設計部門講演会, 2014/04/20, 信州松代ロイヤルホテル(長野県), 査読無

Joon-wan Kim, Satoru Yamasita, Shinichi Yokota, Kazuya Edamura, Micropump-Integrated Balloon Type Microactuators, The 5th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology (ICMDT2013), 2013/05/22, Busan, Korea, 査読有

Joon-wan Kim, Yoshiho Yamada, Shinichi Yokota, Kazuya Edamura, High Performance ECF Micropump by the 3D Integration of MEMS-fabricated Electrodes, The 8th International Conference on Fluid Power Transmission and Control (ICFP 2013), 2013/04/08, Hangzhou, China, 査読有
Shinichi Yokota, Micro Hydraulics Using Functional Fluid ECF, The 8th International Conference on Fluid Power Transmission and Control (ICFP 2013), 2013/04/08, Hangzhou, China, 査読有

Sang In Eom, Shinichi Yokota, Joon-wan Kim, Kazuya Edamura, New Design of an Electrode for ECF Jet Micro Cylinder, 16th International Conference on Mechatronics Technology (ICMT2012), 2012/10/16, Tianjin, China, 査読有
Joon-wan Kim, Yuji Miyagawa, Shinichi Yokota, Kazuya Edamura, Study on Closed Loop ECF Micro Devices for Cooling a Micro Chip, 16th International Conference on

Mechatronics Technology (ICMT2012), 2012/10/16, Tianjin, China, 査読有

その他 42 件の学会発表は省略する。

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

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

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

(3) 連携研究者

()

研究者番号: