

機関番号：12608

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2010

課題番号：21760108

研究課題名（和文）

MEMS技術を用いた管路形マイクロポンプ

研究課題名（英文）

Tube-type micropump by using MEMS technology

研究代表者

金 俊完（KIM Joon-wan）

東京工業大学・精密工学研究所・助教

研究者番号：40401517

研究成果の概要（和文）：

ECF マイクロポンプの高性能化のために、三角柱-スリット形電極対を効率よく製作できる MEMS プロセスを提案し、ECF 電極対の平面集積化を行った。試作した ECF 電極対を用いて ECF マイクロポンプの性能評価を行った結果、吐出圧力は直列化により、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。出力パワーの面では、これまでで最大の出力パワーを有する ECF マイクロポンプが得られた。

研究成果の概要（英文）：

A high power tube-type ECF (Electro-Conjugate Fluid) micropump that consists of triangular prism and slit electrode pairs was proposed and fabricated by MEMS. As advanced ECF micropumps, they were in-plane integrated for high performance by the serialization and parallelization, achieving output power density of the world top class.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2010年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

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：マイクロマシン，MEMS，電界共役流体（ECF），マイクロポンプ，平面集積化

## 1. 研究開始当初の背景

マイクロポンプの応用分野が大きく広がり、従来の機械工学での応用のみならず、生物学、生化学、医学、薬学での試薬・薬剤の搬送・挿入、マイクロエレクトロニクス素子の強制冷却、宇宙開発での小形宇宙船のマイクロ推進制御、燃料電池での燃料のハンドリング、マイクロ流体アクチュエータのパワー源などに広く使用されるようになり、マイクロポンプへの関心が高まっている。Smits らが 1980 年代に始めて MEMS 技術を用いたマイク

ロポンプを発表した以来、多様な原理の新たなマイクロポンプについて 200 件以上の論文が報告されている。このように多様な駆動原理のマイクロポンプが報告されたが、複雑な形状の管路とポンプを一体化したマイクロポンプ（以降、管路形マイクロポンプ）はまだ実現されていない。管路とポンプを一体化すると以下のような長所がある。

(a) 省スペース：マイクロポンプが必要とされる分野ではデバイス自体も小形であるため、マイクロポンプを実装するスペースに

制限がある。一例としてマイクロエレクトロニクス素子の強制冷却の場合、流路とポンプを一体化することによって省スペースが実現できる。(b) 自由な配置: 管路自体がマイクロポンプであるため、障害物などでマイクロポンプが設置不可能な狭小空間にも自由な形で配置できる。(c) 圧力の向上: 管路にポンピング機構を有するため、マイクロポンプを長くすることによってポンピング機構が直列に連結され、長さに比例した発生圧力が得られる。(d) フレキシブルポンプ: さらに柔軟な管路とポンプを一体化することで人工筋肉などのソフトアクチュエータの内蔵形マイクロ流体パワー源として活用できる。このような長所を有する管路形マイクロポンプを実現する必要がある。

## 2. 研究の目的

管路形マイクロポンプを実現するために、電界共役流体 (ECF) とマイクロマシン (MEMS) 技術を融合することを提案する。ECF とは液中に挿入された電極間に直流高電圧を印加するとその間で活発なジェット流を誘導する機能性流体である。申請者はこの ECF を用いた平面 ECF ポンプ ( $90 \times 11 \text{ mm}^2$ ) を製作し、デバイスのサイズは大きくマイクロポンプではないものの ECF のポンプへの有効性を確認した。ECF に発生するジェット流は各要素の微小化に伴い出力エネルギー密度が増加するので、ECF は本研究の目的であるマイクロポンプの駆動源としてより適している。また、ポンピング機構を内蔵するとともに、内径がマイクロメータオーダーの管路形マイクロポンプを実現する加工法として 3 次元 MEMS プロセスを提案する。本研究の目的は MEMS 技術を用いて内径がマイクロメータオーダーの管路形 ECF マイクロポンプを開発し、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) MEMS 技術による管路とマイクロポンプの一体化:

流路高さ、流路幅ともに  $500 \mu\text{m}$  以下の長方形の管路と管路の内側にポンピング機構

(ECF 電極対) の新たな製作方法として、MEMS 技術による多層化プロセスを試みる。本研究の管路形マイクロポンプは複雑な 3 次元構造であり、マイクロの世界では部品の組み立てが容易でないため、すべての部品が MEMS プロセスだけで形成・組み立てできる複雑な 3 次元構造体のプロセスが必要不可欠である。厚膜フォトレジストの電気メッキを用いて複雑な 3 次元電極を製作する。この構造体と電極の製作は申請者が所属する大学のクリーンルームの共同利用機器を基本的に使用するが、本研究のプロセスで重要である電気メッキは共同利用機器としてのメッキ装置がないため、購入予定の電気メッキ装置を使

用する。マイクロ構造体製作に必要な高アスペクト比フォトレジストの購入と申請者が設計する露光用フォトマスクの製作は消耗品費で行う。

(2) 管路形 ECF マイクロポンプでのポンピング機構 (ECF 電極対) の直列・並列化:

本研究の管路形 ECF マイクロポンプは MEMS 技術によるバッチプロセスであるため、簡単に直列化・並列化が可能である。直列化により ECF の発生圧力を向上させて、並列化で流量と応答速度を向上させる効果があることを実験的に明確にする。

(3) ECF 電極対の形状の変更による最適化: ECF に発生するジェット流は、ECF 液中に挿入された電極の形状に依存するため、強力なジェット流の発生には電極形状の最適化が必要不可欠である。有限要素法ソフトウェアによるシミュレーションを行い、最適な寸法と形状を求めて実験で立証する。

## 4. 研究成果

(1) MEMS 技術を用いた管路形ポンプ: MEMS 加工と高吐出圧力を両立するために、針リング状に近い形状で、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。三角柱-スリット形電極対は平面形状をその平面に垂直な方向に伸ばした構造であるため、MEMS 加工が可能である。また、針リング状電極対のように急峻な電界勾配を有するため、高出力が期待できる。提案した管路形 ECF マイクロポンプの主要寸法を決めるため、ワイヤ放電加工で製作された三角柱-スリット形電極を有するプロトタイプを用いて寸法パラメータの最適化実験を行った結果、スリット幅と電極間隔が  $200 \mu\text{m}$  のとき、吐出圧力、流量ともに最大になった。また、先端角度の検討では、 $19^\circ$  で最大出力となったが、 $37^\circ$  でも同程度であった。最適化実験の結果から、MEMS 技術を用いた管路形 ECF マイクロポンプの寸法パラメータをスリット幅  $200 \mu\text{m}$ 、電極間隔  $200 \mu\text{m}$ 、三角柱の先端角度  $30^\circ$  とした。このマイクロポンプは、1) 高アスペクト比、2) 三角柱先端の鋭さ、3) 絶対高さが必要とするため、本研究では、厚膜レジストと電解メッキ技術を融合させた MEMS プロセスを提案した。MEMS 技術で製作した三角柱-スリット形電極対を 8 対直列に配置した新たな管路形 ECF マイクロポンプを製作し、その特性実験を行った。使用した ECF は FF-101、印加電圧は  $2\text{kV}$  で吐出圧力  $19\text{kPa}$  (1 対あたり  $2.4\text{kPa}$ ) を得た。

(2) 管路形マイクロポンプの集積化:

高性能な ECF マイクロポンプを実現するために、三角柱-スリット形 ECF 電極対を直列・並列化にして、これからなる ECF マイクロポンプの出力特性を評価した (図 1, 2)。印加電圧は  $4\text{kV}$  では、直列 10 対のみの電極対からなる ECF マイクロポンプの圧力は  $79\text{kPa}$ 、直

列 10 対×並列 3 対の場合は 73 kPa, 直列 10 対×並列 5 対の場合は 70 kPa であった. この実験結果から, 電極対を並列に増やすことで, ECF マイクロポンプの吐出圧力は少々下がったものの大きな変化はないことが分かった(図 3). しかし, 吐出流量では, 電極対の並列化にともない大きく影響された. 2kV 印加時, 直列 10 対のみ ECF 電極対からなるマイクロポンプの流量は  $34 \text{ mm}^3/\text{s}$  であり, 直列 10 対×並列 3 対の場合の流量はその 2.2 倍,  $74 \text{ mm}^3/\text{s}$ , 直列 10 対×並列 5 対場合の流量はその 3.2 倍,  $110 \text{ mm}^3/\text{s}$  であった(図 4). この結果から, ECF マイクロポンプの吐出流量は並列された ECF 電極の数とともに増加すると分かった.

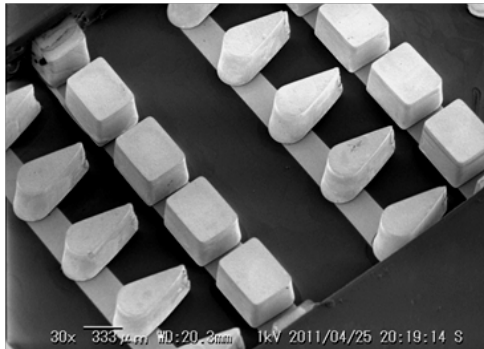


Fig.1 SEM photo of MEMS-fabricated ECF electrodes (integrated with 10 pairs in serial and 5 pairs in parallel)

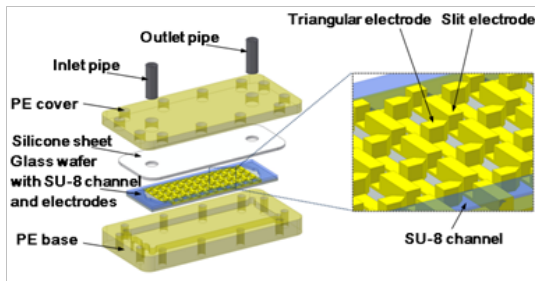


Fig.2 Structure of an ECF micropump (integrated with 10 pairs in serial and 5 pairs in parallel)

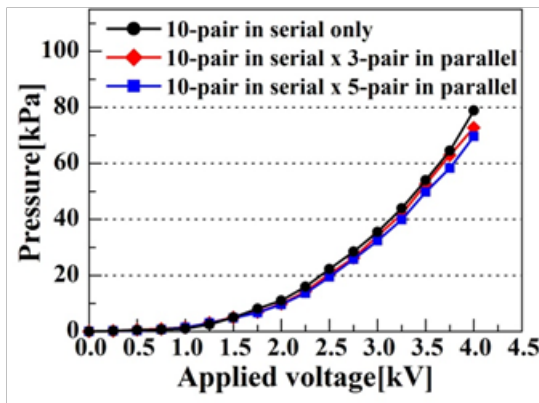


Fig.3 Output pressure with respect to applied voltage

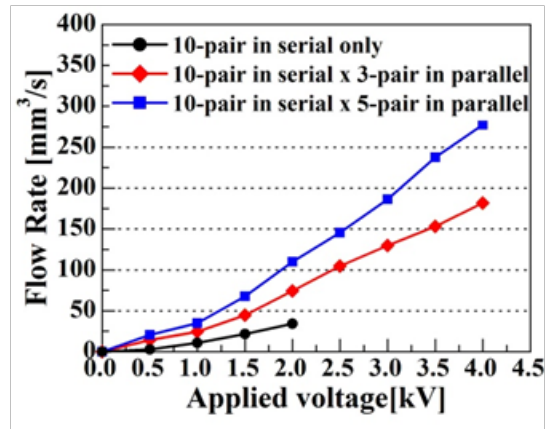


Fig.4 Flow rate with respect to applied voltage

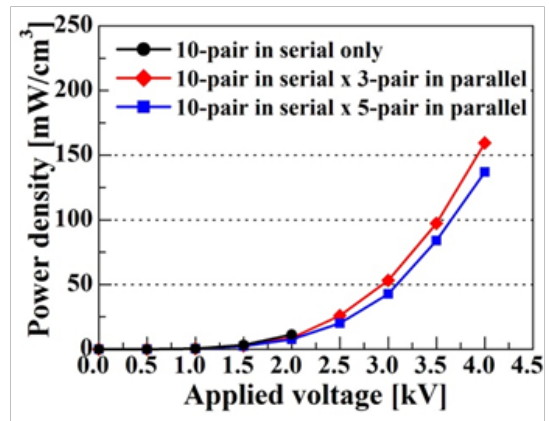


Fig.5 Estimated maximum output power density with respect to applied voltage

ECF マイクロポンプの出力パワーは ECF 電極の数とともに増加する結果が得られた. 最大概算出力パワーは 4 kV 印加時に得られた結果であり, 直列 10 対×並列 3 対の場合は 3.3 mW, 直列 10 対×並列 5 対の場合は 4.8 mW であった. これらの出力パワーを体積で除した出力パワー密度は, 直列 10 対×並列 3 対で  $159 \text{ mW}/\text{cm}^3$ , 直列 10 対×並列 5 対で  $137 \text{ mW}/\text{cm}^3$  であり(図 5), マイクロポンプとしては世界最高水準のパワー密度が得られることが明らかになった.

(3) 応用 (その 1) 液体マイクロレンズ: 製作した ECF マイクロポンプを用いて図 6 のような液体マイクロレンズユニットを組み立て, 圧力特性実験を行った. 本実験装置では ECF (FF-101EHA2, 新技術マネージメント社製) を注入口から供給して, 発生圧力によるレンズ膜の変化を観察するとともに, 吐出口を設けて発生圧力を同時に測れるように工夫した. 発生圧力は, ECF ジェットによって生じる液面差  $h$  を測定し, この値から ECF ジェットの発生圧力を  $P = \rho gh$  により算出した. 印加電圧の増加にともない, 発生圧力が 2 次関数的に増加しており, それにともないレンズ膜 (内径 5mm) が膨らみ形状が変化してい

ることがレンズの下にある文字から明らかになった (図 7).

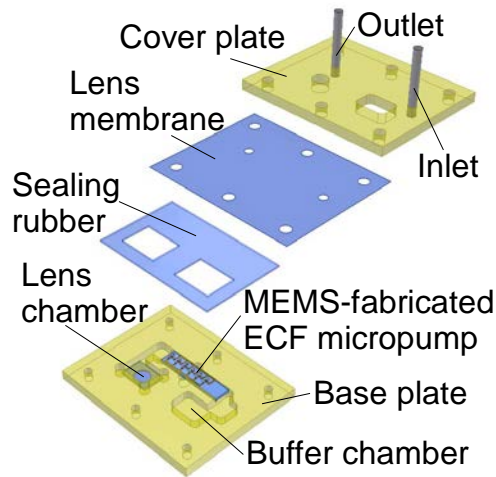


Fig.6 Experimental setup of ECF microlens

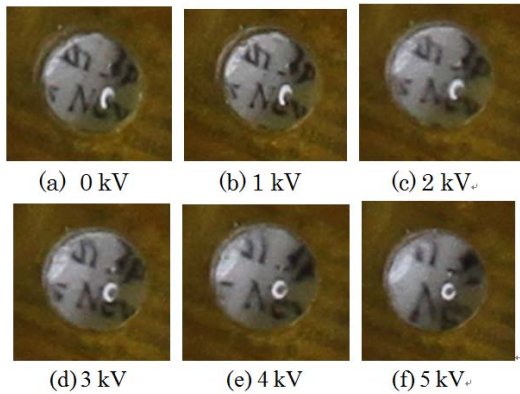


Fig.7 ECF microlens with respect to applied voltages

(4)応用 (その 2) 液体レートジャイロ : 管路形 ECF マイクロポンプと電極対をパターンニングしたガラスウエハを土台に収め、流路を ECF で満たし、ホットワイヤを取り付けたカバーを被せることで ECF マイクロレートジャイロを試作した (図 8)。この ECF マイクロレートジャイロの特性実験を行った。使用する ECF は FF-8EHA2 (新技術マネジメント社製) とし、ホットワイヤへの印加電流は断線せずに十分な発熱が得られる 60mA とした。図 9 は、同様の角加速度を加えた際の、リファレンス用ジャイロと ECF マイクロレートジャイロの出力を示している。ただし、ECF マイクロレートジャイロの出力電圧は数 mV 程度であるため増幅しているほか、カットオフ周波数 8.6Hz の一次のローパスフィルタを回路に挿入している。なお、実験装置の都合上、ECF マイクロレートジャイロの出力結果はリファレンス用ジャイロと逆位相になっている。実験の結果、ジェット発生部への印加電圧が 0.41kV の際に、スケールファクタは  $1.9\text{mV}^\circ/\text{s}$  となった。ノイズ成分は多いもの

の、ジャイロとしての動作を確認することができた。

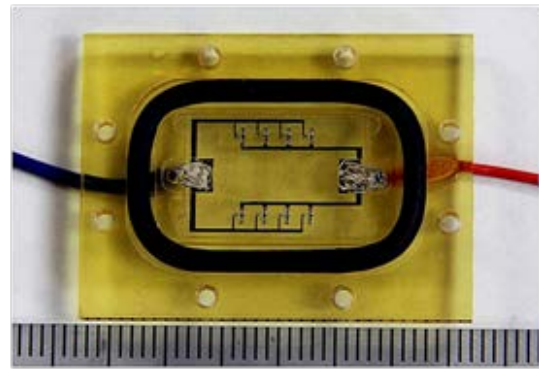


Fig.8 ECF micro rate gyroscope

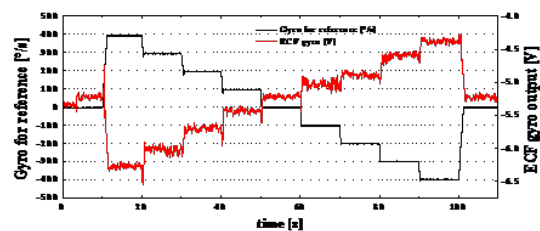


Fig.9 Experimental setup of ECF microlens

## 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 0 件)

[学会発表] (計 17 件)

- ① 金俊完, 由元崇, 横田眞一, 枝村一弥, MEMS 技術を用いた ECF 可変焦点マイクロレンズの提案, 平成 22 年秋季フルードパワーシステム講演会, 2010/12/03, 大分県別府市
- ② 鈴木俊也, 金俊完, 横田眞一, 枝村一弥, 今村恒彦, MEMS 技術による ECF マイクロレートジャイロの開発, 平成 22 年秋季フルードパワーシステム講演会, 2010/12/03, 大分県別府市
- ③ Hai-bo Wang, Joon-wan Kim, Shinichi Yokota, Kazuya Edamura, A High Performance ECF-jet Generator using Improved Three-dimensional Electrode Structures, The 14th International Conference on Mechatronics Technology (ICMT2010), 2010/11/24, 大阪府
- ④ Tsunehiko Imamura, Toshiya Suzuki, Joon-wan Kim, Shinichi Yokota, Kazuya Edamura, Miniaturization of ECF Micro Rate Gyro by using MEMS Technology, The 14th International Conference on Mechatronics Technology (ICMT2010),

- 2010/11/24, 大阪府
- ⑤ Joon-wan Kim, Vinh Vinh Nguyen, Shinichi Yokota, Kazuya Edamura, MEMS-based tube-type micropump by using electro-conjugated fluid (ECF), ICCEM2010, 2010/9/6, Rome, Italy
  - ⑥ 王海波, 金俊完, 横田眞一, 枝村一弥, 三角柱-スリット形電極対を用いた ECF ジェット発生器の性能評価 MEMS 技術を用いた管路形 ECF マイクロポンプ, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2010, 2010/6/15, 旭川市
  - ⑦ グエン ヴィンソン タン, 金俊完, 横田眞一, 枝村一弥, MEMS 技術を用いた管路形 ECF マイクロポンプ, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2010, 2010/6/15, 旭川市
  - ⑧ 鈴木俊也, 横田眞一, 金俊完, 今村恒彦, 枝村一弥, MEMS 技術による ECF マイクロレートジャイロの特性評価, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2010, 2010/6/15, 旭川市
  - ⑨ 鈴木俊也, 金俊完, 横田眞一, 枝村一弥, 今村恒彦, MEMS 技術による ECF マイクロレートジャイロの開発, 平成 22 年度春季フルードパワーシステム学術講演会, 2010/5/28, 東京都
  - ⑩ 金俊完, 横田眞一, 枝村一弥, ECF を用いた可変焦点マイクロレンズ, 平成 22 年度春季フルードパワーシステム学術講演会, 2010/5/28, 東京都
  - ⑪ 金俊完, 鈴木俊也, 横田眞一, 枝村一弥, MEMS 技術を用いた ECF マイクロレートジャイロ, 第 22 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム (SEAD22), 2010/5/21, 福岡県
  - ⑫ 金俊完, グエン ヴィンソン タン, 横田眞一, 枝村一弥, MEMS 技術を用いた高出力管路形 ECF マイクロポンプ, 日本機械学会機素潤滑設計部門講演会, 2010/4/19, 新潟県
  - ⑬ グエン ヴィンソン タン, 金俊完, 枝村一弥, 横田眞一, 管路形 ECF ポンプの最適化, 平成 21 年 秋季フルードパワーシステム講演会, 2009/11/26, 東京都港区
  - ⑭ 井上潤一, 横田眞一, 金俊完, 枝村一弥, ECF ジェットの発生圧力に関する研究, 平成 21 年 秋季フルードパワーシステム講演会, 2009/11/26, 東京都港区
  - ⑮ Joon-wan Kim, Toshiya Suzuki, Shinichi Yokota, Kazuya Edamura, Tube-Type Micropump By Using Electro-Conjugated Fluid (ECF), 13th International Conference on Mechatronics Technology ICMT 2009, 2009/10/21, Cebu City, Philippines
  - ⑯ Joon-wan Kim, Toshiya Suzuki, Shinichi

Yokota, Kazuya Edamura, Tube-type ECF Pump, The 3rd International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology (ICMDT2009), 2009/6/25, Jeju Island, Korea

- ⑰ 金俊完, 鈴木俊也, 横田眞一, 枝村一弥, 管路形 ECF ポンプ, 第 21 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム (SEAD21), 2009/5/21, 長野市

〔図書〕 (計 1 件)

Shinichi Yokota, Kazuhiro Yoshida, Kenjiro Takemura, Joon-wan Kim, Springer, London, Next-Generation Actuators Leading Breakthroughs, Part III Micro Actuators, New Microactuators Using Functional Fluids, 2010, pp. 91-101

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

金 俊完 (KIM JOON-WAN )  
 東京工業大学・精密工学研究所・助教  
 研究者番号：40401517