

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年5月30日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2012

課題番号：23760133

研究課題名（和文） MEMS技術を用いたECF可変焦点マイクロレンズ

研究課題名（英文） Focus-Tunable ECF Microlens 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）：

光学撮影系を有する電子機器のための薄くてマイクロな可変焦点レンズシステムとして ECF マイクロポンプを組み込んだ可変焦点形液体レンズの開発を行なった。これは薄膜を用いた液体レンズを ECF ジェットの発生圧力により駆動するものである。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 電極対の集積化を行った。ラージモデルを製作し、印加電圧により焦点距離を変更できることを確認した。また、流路などを MEMS 技術により製作することで ECF マイクロポンプを組み込んだ小形な可変焦点形液体レンズを実現し、この可能性を示した。

研究成果の概要（英文）：

This research proposes a novel elastomer-based and liquid-filled tunable microlens by using an electro-conjugate fluid (ECF) jet and MEMS technology. Tuning an elastomer-based microlens is to change the geometry of the boundary determined by the control pressure of the chamber by using an ECF micropump inside the tunable microlens. A high power ECF micropump that consisted of triangular prism and slit electrode pairs was proposed and fabricated by MEMS technology. As advanced ECF micropumps, they were integrated for high performance by the serialization and parallelization, achieving output power density of the world top class. The prototypes whose ECF micropump were integrated and fabricated by MEMS technology were manufactured and experimentally investigated. The experimental results showed the feasibility of micro varifocal lens devices powered by ECF jet.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,400,000	1,020,000	4,420,000

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：MEMS, 電界共役流体 (ECF), マイクロポンプ, 可変焦点マイクロレンズ

## 1. 研究開始当初の背景

多様な光流体力学のデバイスのなか、焦点を調整可能な液体マイクロレンズに関する研究は、(a)携帯電話用のカメラ、(b)手術用の光学視管、(c)偵察カメラ、(d)薄形スキャナー、

(e)光通信デバイスなどへの応用が高まり、今までに多様な原理の液体マイクロレンズについて 100 件以上の論文が報告されていた。可変焦点形の液体マイクロレンズは、1)レンズの形状を変化させるものと、2)液体自体の

屈折率を変化させるもので大きく2種類に分類され、物性(屈折率)の変化には限界があり、レンズ形状の変化による調整が主流であった。レンズ形状を変化させる原理として、a) **Electrowetting**, b)柔軟なレンズチャンバーの内圧の制御による焦点の調節がおもに研究されていた。これまでの原理は多様な短所、限界があり、コンパクトなデバイスに搭載できる液体マイクロレンズはまだ実現されていなかった。一例として携帯電話用のカメラの場合、耐衝撃(落下試験: 1.8m, 作動回数5万回)、低コスト、省電力、高速、小形、多様な形状など非常に厳しい条件が求められるため、これらをすべて満たす液体マイクロレンズは未だに実現されていなかった。

このような背景から、耐衝撃性を有しコンパクトでありながら焦点を調整可能な液体マイクロレンズの実現を目的とし、電界共役流体(**Electro-Conjugate Fluid: ECF**)に着目した。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るため、レンズ形状を調整する圧力源を液体マイクロレンズユニットに内蔵することができると判断した。また、**ECF** ジェットは装置の寸法が小さくなるほど、これによるパワー密度が大きくなることから、レンズチャンバーを有する液体マイクロレンズのマイクロ化に適していると判断した。このような背景から、**ECF** ジェットを用いて、ポンピング機構を内蔵した可変焦点形マイクロレンズを **MEMS** 技術で実現できると判断した。

## 2. 研究の目的

耐衝撃性を有しコンパクトでありながら焦点を調整可能な液体マイクロレンズを実現するために、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**)の発生圧力で駆動する新たなレンズシステムを提案する。このレンズシステムは、(a) **ECF** ジェット発生部と(b) シリコンゴム膜を用いたフレキシブルレンズモジュールで構成されて、このレンズシステムの焦点は **ECF** ジェットの発生圧力によるシリコンゴム膜の形状変化で調整できる。マイクロレンズシステムを **MEMS** 技術で実現して、その特性評価を行う。

## 3. 研究の方法

### (1) **MEMS** 技術を用いた **ECF** マイクロポンプの集積化

提案する三角柱ースリット形電極対は、1)高アスペクト比、2)三角柱先端の鋭さ、3)絶対高さを必要とするため、汎用のシリコン **MEMS** 技術では実現が難しい。そこで本研究では、厚膜レジストと電解メッキ技術を融合させた **MEMS** プロセスを提案する。(a)電

解メッキのシード層として **Au/Ti** を蒸着し、フォトリソグラフィを用いて電極パターンを形成する。(b)厚膜フォトレジストを用いて電解メッキ用の鋳型を形成する。(c)ニッケルの電解メッキを用いてシード層からメッキを成長させる。(d)剥離剤を用いて鋳型である厚膜フォトレジストを選択的に除去することで高アスペクト比の三角柱ースリット形電極が完成する。電解メッキ用の鋳型の形成には、**SU-8** と同様の光透過性を持ち、選択的に除去可能な厚膜レジストである **KMPR** (化薬マイクロケム社)を用いて試作する。この **MEMS** プロセスを用いて三角柱ースリット形電極対を直列・並列に配置してその性能評価を行う。提案された三角柱ースリット形電極対の主要パラメータであるスリット電極のスリット幅、電極間隔、三角柱電極の先端角度であり、この寸法を基準とし最適値を求める。

### (2) マイクロレンズシステムの構築と評価

本研究でのシリコンゴム膜はレンズの形状になるため、優れた光透過性を持つ **PDMS** (**polydimethylsiloxane**)を用いる。最初は凹凸がないフラットな膜を形成する。より高性能なマイクロレンズの実現のため、超精密機械加工を用いて鋳型を製作し、非球面などの複雑なマイクロレンズのシリコン膜を形成する。また、さらなる小形化のために **MEMS** 技術による鋳型を製作する。マイクロ流路、**ECF** ジェット発生部、レンズ膜などを高い精度でレンズシステムを組み立てるために、製作とともに装置上で組み立てができる **MEMS** 製作プロセスを開発する。このように製作した可変焦点形液体レンズを実現し、性能評価を行なう。

## 4. 研究成果

### (1) 平面集積化による **ECF** マイクロポンプの高性能化

三角柱ースリット形電極対(**TPSE**)を直列化したマイクロポンプでは、その数に比例した発生圧力の上昇を確認したが、さらなる高パワー密度化を実現するために、この **TPSE** を平面集積化にして、これらからなる **ECF** マイクロポンプの出力特性を評価した。

図1のプロセスを用いて、スリット幅 **200 $\mu$ m**、電極間隔 **200 $\mu$ m**、三角柱の先端角度 **30°**の主要寸法パラメータを有する **TPSE**の平面集積化に成功した。製作した **TPS** 電極対を図2に示す。

図3のように、製作した平面集積形 **TPS** 電極対をプラスチックの土台に設置し、漏れ防止用のシリコーンシートとプラスチックのカバーで密封することで、**ECF** マイクロポンプを構成した。吐出圧力(図4)を測定した結果、印加電圧は **4kV** では、直列 **10** 対のみの **TPS** 電極対からなる **ECF** マイクロポンプの

圧力は 79kPa, 平面集積化による直列 10 対×並列 3 対の場合は 73kPa, 直列 10 対×並列 5 対の場合は 70kPa 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.

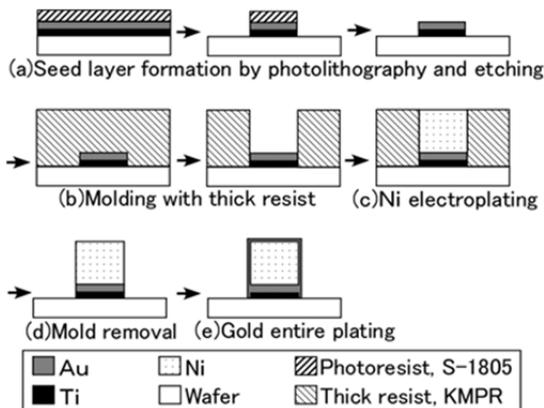


Fig.1 MEMS Fabrication Process of a TPSE for ECF micropumps

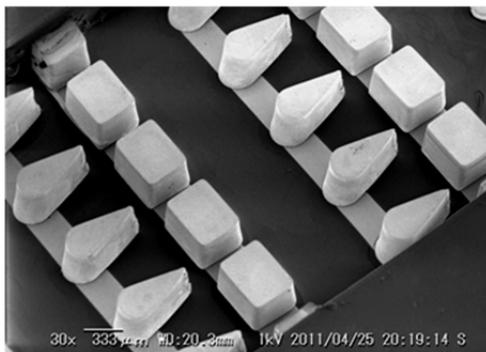


Fig.2 SEM photo of MEMS-fabricated ECF electrodes (integrated with 10 pairs in serial and 5 pairs in parallel)

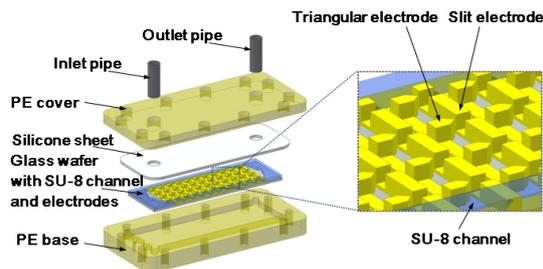


Fig.3 Schematics of ECF micropump by the In-plane Integration of MEMS-fabricated electrodes

しかし, 吐出流量(図 5)は, 電極対の並列化にともない大きく増加した. 2kV 印加時, 直列 10 対のみ TPS 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 倍である  $74 \text{ mm}^3/\text{s}$  で, 直列 10 対×並列 5 対の流量は

その 3.2 倍になる  $110 \text{ mm}^3/\text{s}$  であった. この結果から, ECF マイクロポンプの吐出流量は並列化された ECF 電極の数とともに増加することが分かった.

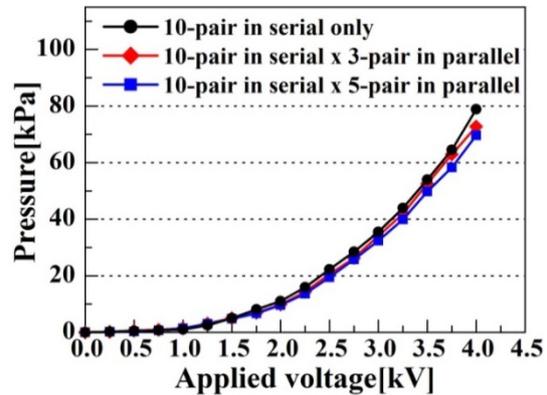


Fig.4 Output Pressure Comparison in In-plane Integration

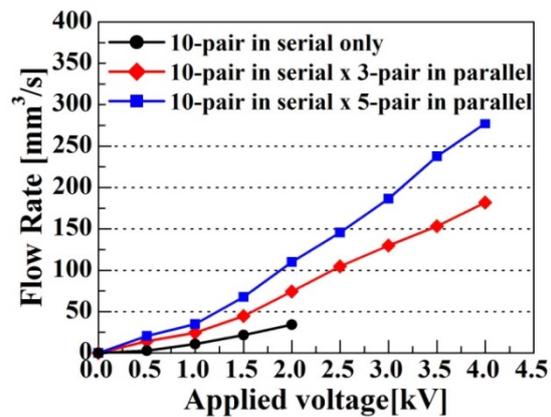


Fig.5 Flow Rate Comparison in In-plane Integration

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  $3.3 \text{ mW}$ , 直列 10 対×並列 5 対の場合は  $4.8 \text{ mW}$  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, 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.

## (2) 三次元集積化による ECF マイクロポンプの高出力化

さらなる高出力パワー密度のマイクロポンプを実現するために, TPSE を三次元的に集積した三次元集積 ECF マイクロポンプ (3D-integrated ECF Micro Pump, 3D-EMP) の開発した. 図 6(b)のように, TPSE を高さ方向に伸長することで実現される高アスペ

クト比化(Higher Aspect Ratio, HAR)を提案した。

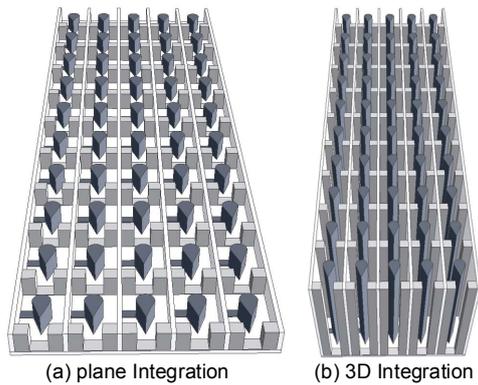


Fig.6 Concept of the 3D integration of the TPSE by HAR

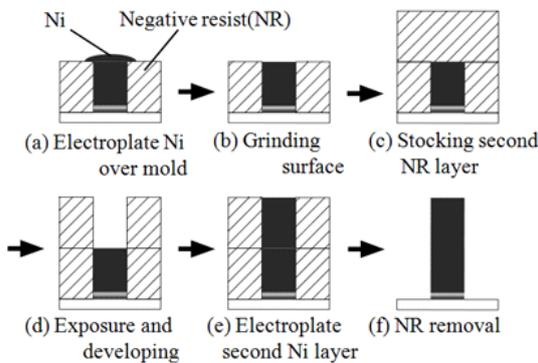


Fig.7 Multilayer MEMS fabrication processes combined with mechanical machining of grinding for HAR TPSE)

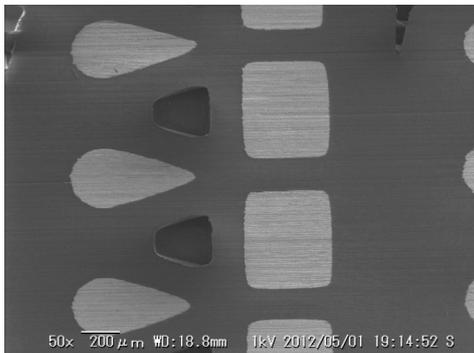


Fig.8 Ground surface of the micro mold with nickel electrodes

高アスペクト比化は、体積が純粋に電極部のみが上昇するため、パワー密度の低下が生じない可能性が高いだけでなく、ポンプ内の流路の断面積が上昇するため、内部の流路における圧力損失が低下し、パワー密度が上昇する可能性もある。多層化による高アスペクト比化のMEMS製作プロセスを図7に示す。1層目の研削後のウェハの厚さをマイクロメータで測定した結果、500 $\mu\text{m}$ 厚のガラスウェハを含む全体の厚さは、誤差 $\pm 0.5\mu\text{m}$ 以下

の範囲であった。また、図8で示すように、ニッケル構造体とその鋳型の境界は明確に維持できた。この結果より、本研究で用いているプロセスにおいては、十分な精度で研削が行えたと判断できる。

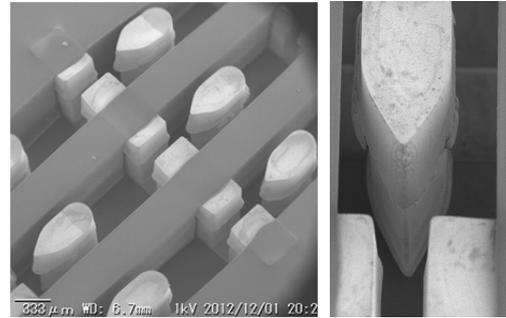


Fig.9 Higher aspect ratio of TPSE by multi-layer

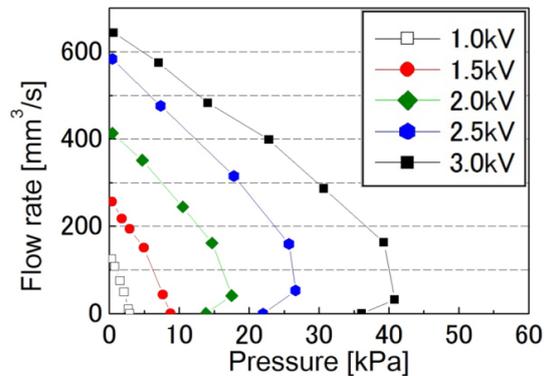


Fig.10 Characteristics of 3D-EMP (HAR)

二次元での集積数は、直列10対 $\times$ 並列3対である。図9で示すように、製作した3D-EMP (HAR)は、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60 $^\circ$ 、電極柱の高さ880 $\mu\text{m}$ であり、ポンプ部の体積は流路長21.0mm $\times$ 流路幅2.1mm $\times$ 高さ0.88mmである。実験に使用するECFはFF-101EHA2であり、室温23度、湿度30%の条件で測定を行った。図10に3D-EMP (HAR)の圧力-流量特性を示す。流量特性が最も優れているのは3D-EMP (HAR)であり、3.0kV印加時に2D-EMPと比べて、2.1倍の流量であった。

### (3) ECF マイクロポンプ組み込み可変焦点形液体レンズ

提案する ECF ポンプを用いた可変焦点形液体レンズの概略図を図11に示す。本レンズは、薄膜レンズ部と ECF ジェット発生部、ECF タンクから構成される。薄膜レンズ部は、弾性膜が貼り付けられた円形の穴と透明なガラス窓を持ち、薄膜に圧力を印加することで薄膜がドーム形に変形し、レンズとして機能する。ECF ジェット発生部には MEMS 技術により作られる微細な電極対が配され、ECF タンク部から薄膜レンズ部の方向に

ECF ジェットを生じるようになっている。ECF タンク部も薄膜レンズ部と同様に弾性膜を有し、ECF タンク部から薄膜レンズ部へ ECF が体積移動する際には弾性膜の変形を伴う。ECF ジェット発生部に印加する電圧を制御することで発生圧力が変化し、それに伴い薄膜レンズの変形形状も変化するため焦点距離を操作することができる。

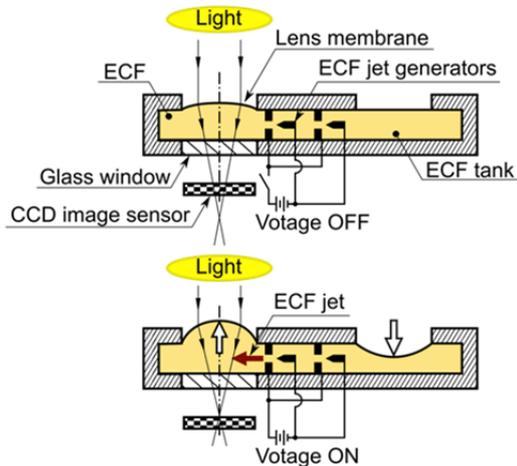


Fig.11 Schematic image of varifocal liquid lens with ECF jet

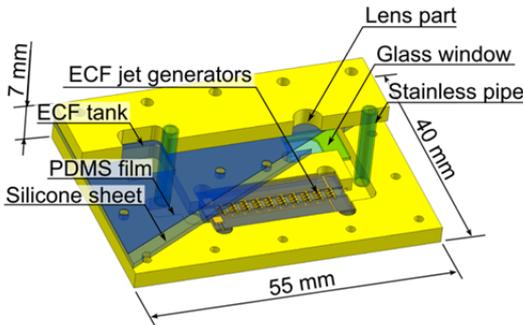


Fig.12 Schematic image of the large model

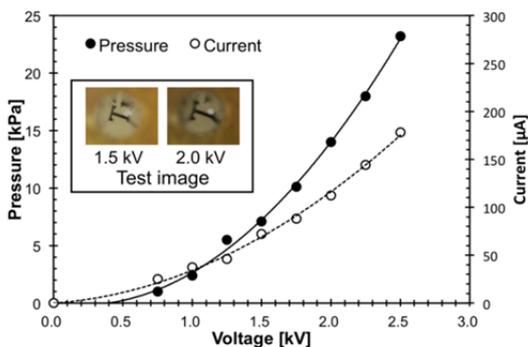


Fig.13 Experimental results

ラージモデル(図 12)は、ECF ジェット発生部を MEMS 技術により製作し、薄膜レンズ部や ECF タンク、流路などを設けたポリエーテルイミド(PEI)樹脂製のケースに組み合わ

せる構成とした。シールには 1 mm 厚のシリコンゴムシートを、レンズ用の弾性膜には 100 μm 厚の PDMS を使い、レンズ径は 5 mm とした。電極対は流れの方向(直列)に 10 対、流れと垂直な方向(並列)に 3 対並べたものを製作、使用した。大きさはパイプを除いて 55 mm×40 mm×7 mm である。

動作実験は ECF に FF-101EHA2 (新技術マネジメント社製)を使用し、雰囲気条件は室温 26 °C、湿度 70 %で行った。測定された発生圧力と電流値、観察されたテストイメージの様子を図 12 に示す。テストイメージの拡大率にも変化があり、焦点距離が操作できることが確認された。

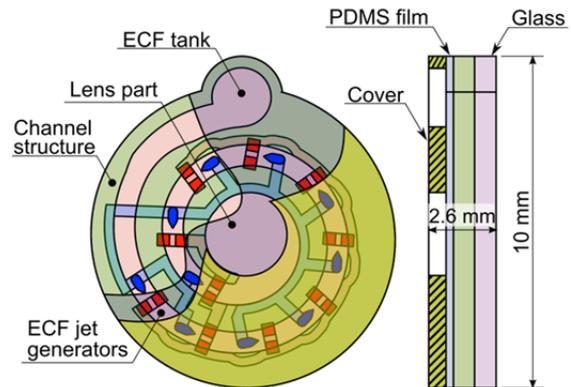


Fig.14 Schematic image of varifocal liquid lens with integrated ECF micro pump

ECF マイクロポンプを組み込んだ形で設計した可変焦点形液体レンズの外観を図 14 に示す。薄膜レンズ部を中心に電極対を螺旋形に滑らかに配置することで省スペース化と損失の低減を図っている。レンズ径は 3 mm、大きさは直径 10 mm の円より小さく、厚さは 2.6 mm 程度である。電極の数は、直列 10 対、並列 1 対である。発生圧力は薄膜レンズ部の変形量に関係し、焦点距離の変化量を決定する重要な要素となると考えられる。一方、発生流量は薄膜レンズ部の変形速度に関係し、焦点距離調節の応答性を決定する重要な要素となると考えられる。今後は、発生可能な圧力と流量を実験により確認し、電極対の直列数と並列数の組み合わせを決定していく必要がある。それに伴い弾性膜の厚さやヤング率なども決定しなければならない。

また、本設計のレンズを実現するためには、螺旋形に配した ECF 発生部の製作や、弾性薄膜と流路及び電極対の漏れのない接着方法の確立、ECF の封入方法の確立といった技術的課題が存在する。今後はこれらの課題を解決して本設計のレンズを製作、評価し、光学撮影系を有する電子機器に向けた最適な設計を行う計画である。さらなる展望として、電極対の微細化を進め、より小形な可変焦点形液体レンズを実現することが考えられる。

## 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 2 件)

- ① Joon-Wan Kim, Takashi Yoshimoto, Shinichi Yokota, Kazuya Edamura, Concept of a Focus-Tunable ECF Microlens and Fabrication of a Large Model Prototype, International Journal of Automation Technology, 査読有, Vol.6, No.4 (2012) pp. 476-481.
- ② J.-w. KIM, T. SUZUKI, S. YOKOTA, K. EDAMURA, Tube-type micropump by using electro-conjugated fluid (ECF), Sensors and Actuators A: Physical, 査読有, Vol.174 (2012) pp. 155-161.

[学会発表] (計 20 件)

- ① Sang In Eom, Shinichi Yokota, Joon-wan Kim, Kazuya Edamura, New Design of an Electrode for ECF Jet Micro Cylinder, ICMT2012, 2012/10/17, Tianjin (China).
- ② Yoshiho Yamada, Joon-wan Kim, Shinichi Yokota, Kazuya Edamura, ECF Micropump by the 3D Integration of MEMS-fabricated Triangular Prism and Slit (TPS) Electrode Pairs, ICMT2012, 2012/10/17, Tianjin (China).
- ③ Joon-wan Kim, Yuji Miyagawa, Shinichi Yokota, Kazuya Edamura, Study on Closed Loop ECF Micro Devices for Cooling a Micro Chip, ICMT2012, 2012/10/17, Tianjin (China).
- ④ 山下悟, 金俊完, 横田眞一, 枝村一弥, ECF ジェット駆動バルーン形マイクロアクチュエータ, 山梨講演会, 2012/10/27, 山梨大学 (山梨県).
- ⑤ 金俊完, 山田嘉穂, 横田眞一, 枝村一弥, 三角柱-スリット形電極を用いた ECF マイクロポンプの立体集積化, Robomec2012, 2012/5/29, アクトシティ浜松 (静岡県).
- ⑥ 金俊完, 王海波, 横田眞一, 枝村一弥, MEMS 技術を用いた ECF 三角柱-スリット形電極対の性能評価, 機素潤滑設計部門講演会, 2012/4/24, 愛媛県県民文化会館 (愛媛県).
- ⑦ 金俊完, 山田嘉穂, 横田眞一, 枝村一弥, 三角柱-スリット形電極対の三次元集積化による ECF マイクロポンプ, 機素潤滑設計部門講演会, 2012/4/24, 愛媛県県民文化会館 (愛媛県).
- ⑧ Joon-wan Kim, Vinh Xuan Thanh Nguyen, Shinichi Yokota, Kazuya Edamura, High

Performance ECF (Electro-Conjugate Fluid) Micropump by the In-plane Integration of MEMS-fabricated electrodes, ICMT2011, 2011/12/1, Melbourne (Australia).

- ⑨ Haibo Wang, Joon-wan Kim, Shinichi Yokota, Kazuya Edamura, Parameter Optimization on Power Density of MEMS-based Micro Triangular prism slit Electrode Array as an ECF-jet Generator, ICMT2011, 2011/11/30, Melbourne (Australia).
- ⑩ Haibo Wang, Joon-wan Kim, Shinichi Yokota, Kazuya Edamura, Performance Evaluation of a Triangular-Prism-Slit Electrode Pair As an Electro-Conjugate Fluid Jet Generator, Bath/ASME Symposium on Fluid Power and Motion Control, 2011/11/1, Arlington, VA (USA).
- ⑪ Joon-wan Kim, Shinichi Yokota, Kazuya Edamura, Needle-ring electrode pair as an ECF-jet generator by using MEMS technology, JFPS international Symposium, 2011/10/27, OKINAWA (Japan).
- ⑫ Haibo Wang, Joon-wan Kim, Shinichi Yokota, Kazuya Edamura, Parameter optimization of MEMS-based micro triangular-prism-slit electrode pair as an electro-conjugate fluid jet generator, JFPS international Symposium, 2011/10/27, OKINAWA (Japan).
- ⑬ Haibo Wang, Joon-wan Kim, Shinichi Yokota, Kazuya Edamura, A flexible electro-conjugate fluid micropump with 3D TPS electrode pair, FPM2011, 2011/8/19, Beijing (China).
- ⑭ Joon-wan Kim, T. Yoshimoto, Shinichi Yokota, Kazuya Edamura, Focus-tunable ECF microlens by MEMS technology, FPM2011, 2011/8/18, Beijing (China).
- ⑮ グエン ヴィンソンタン, 金俊完, 横田眞一, 枝村一弥, 三角柱-スリット形電極の直列・並列化による ECF マイクロポンプの性能評価, Robomec2011, 2011/5/27, 岡山コンベンションセンター (岡山県)

## 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