

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 23 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630084

研究課題名(和文)電界応答ポリマーからなる新規なマイクロモータに関する研究開発

研究課題名(英文)Research and development of novel micro-motors exploiting electro-active polymers

研究代表者

中野 政身 (NAKANO, Masami)

東北大学・流体科学研究所・教授

研究者番号：40147947

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：非導電性の微粒子を誘電性の液体に浸し、一定電場強度以上の一様なDC電場を印加すると微粒子が回転する「Quincke rotation」という現象を活用したマイクロファブリケーションに適した新規なマイクロモータの実現を目的に、そのロータとして微粒子をゼラチンに混入して硬化させた電界応答ポリマーコンポジットやフォトリソグラフィ法に適するエポキシ系ポリマーであるフォトレジストSU-8からなる様々な形状やサイズのディスクロータを創製し、その誘電液体中での一様DC電場下での回転制御特性を明らかにするとともに、一辺3mmで高さ7mmの直方体の簡易型のマイクロモータを実現している。

研究成果の概要(英文)："Quincke rotation" is the rotation of non-conducting objects immersed in dielectric liquid and subjected to a strong uniform DC electric field. The rotation is spontaneous when the field exceeds a threshold value. In this research, for the purpose of developing a micro motor utilizing the Quincke rotation, electro-active polymer composites and an epoxy-based polymer SU-8 have been developed as materials for a micro motor rotor, and the motor characteristics are investigated as a function of applied uniform DC electric field intensity, the diameter and thickness of the rotors with shapes such as disk, hollow cylinder and gear. The rotational speed of the micron-sized rotors can be conveniently tuned in wide range (between 200 - 3000 rpm) by the electric field intensity, opening new perspectives for their use in several MEMS applications. Finally, a miniaturized cubic motor of 3mm square and 7mm height with the polymer composite rotor has been fabricated.

研究分野：工学、機械工学、流体工学、機械力学・制御、知能機械

キーワード：機能性材料 MEMS 電界応答ポリマー ポリマーコンポジット エポキシ系ポリマー 回転現象 マイクロモータ

### 1. 研究開始当初の背景

現在実用化されているマイクロモータの駆動原理は、静電方式、電磁方式、圧電方式などに大別でき、それぞれに一長一短がある。本研究では、誘電正の液体に浸された非導電性の微粒子が一定電場強度以上の一様なDC電場を印加すると回転する「Quincke rotation」という現象<sup>(1)</sup>を活用したマイクロモータを提案する。このマイクロモータは、二つの平行電極（一様なDC電場印加）だけで回転可能なことから、従来の静電マイクロモータ等にある複雑なスイッチング回路の簡易化、モータ自体の更なる小型化かつ軽量化などの利点が挙げられ、MEMS用のマイクロモータとして大いに期待できる。しかしながら、これまでのQuincke rotationに関する研究は、非導電性の球形微粒子の回転運動の原理や理論に焦点を当てたものが多く<sup>(2),(3)</sup>、マイクロモータとしての活用を前提にした研究例は少ない。特に、本研究で対象とする非導電性の微粒子をポリマーに混入したコンポジットは、研究代表者らが世界で初めて提案しその回転現象を見出したもので<sup>(4)</sup>、その形状の成形の容易性から比較的小型の円盤や円柱状のロータ素材に適している。また、フォトリソグラフィによるマイクロファブリケーションが可能でMEMS用モータロータ素材としてのポテンシャルを有している。研究代表者らの上記の研究成果を進展させ、電界応答ポリマーコンポジットやSU-8を用いた新規で革新的なマイクロモータを開発するものであり、MEMS技術分野への貢献が大いに期待できる。

本研究では、この「Quincke rotation」現象を活用したマイクロファブリケーションに適した新規なマイクロモータの実現を目指す。マイクロモータのロータとして微粒子をポリマーに混入して硬化させた電界応答(EA: Electro-Active)ポリマーコンポジットやフォトリソグラフィ法に適するエポキシ系ポリマーであるフォトリソグラフィ法によるマイクロファブリケーションが可能でMEMS用モータロータ素材としてのポテンシャルを有している。研究代表者らの上記の研究成果を進展させ、電界応答ポリマーコンポジットやSU-8を用いた新規で革新的なマイクロモータを開発するものであり、MEMS技術分野への貢献が大いに期待できる。

### 2. 研究の目的

本研究では、電界応答ポリマーをマイクロモータのロータとしたマイクロファブリケーションに適した新規なマイクロモータを実現するために、下記の3点を研究目的とする。

(1) 非導電性の微粒子をポリマーに分散して硬化させた電界応答ポリマーコンポジットからなるディスクロータが誘電体の液体中で回転するマイクロモータを創製して、一様DC電場下でのそのモータとしての回転制御特性を把握しその可能性について検討す

る。

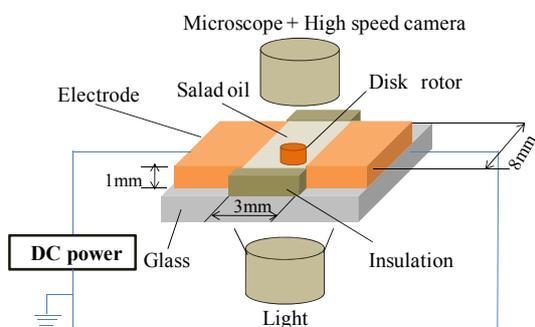
(2) マイクロファブリケーションにより適したフォトリソグラフィSU8から成るエポキシ系電界応答ポリマーをロータとし、誘電液体中で回転するマイクロモータを創製して、一様DC電場下でのそのモータとしての回転制御特性を把握しその可能性について検討する。

(3) 電界応答ポリマーコンポジットの柱状ロータからなる超小型の簡易なマイクロモータを試作し、一様DC電場下でのそのマイクロモータのモータ特性を把握する。さらに、一様DC電場の印加では、ロータの回転方向は任意であることから、その回転方向を制御する方法について検討する。

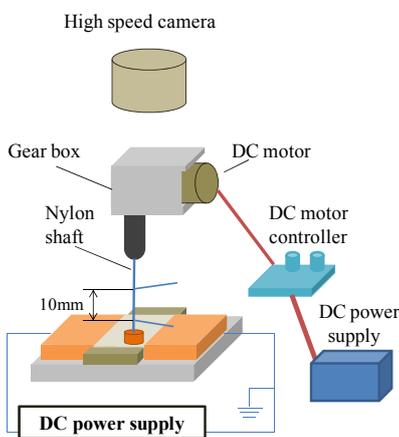
### 3. 研究の方法

(1) 電界応答ポリマーコンポジットからなるマイクロモータの回転制御特性：これまでの研究で実績のある、オキシ水酸化鉄( $\alpha$ -FeO(OH))の粉末をゼラチンに分散混合して硬化させた電界応答ポリマーコンポジットからなる各種のディスクロータを、その混合比、直径、厚さを変化して創製する。その各種ディスクロータの誘電液体中でのDC印加電場強度に対する無負荷回転速度特性と回転数-トルク特性とを測定し、コンポジットの混合比、ディスクロータサイズ及び印加電場への依存性を明らかにする。

無負荷回転速度特性の測定は、図1(a)に示すように、直径 $d(=0.75\sim 1.5\text{ mm})$ 、厚さ $t(=0.2\sim 0.6\text{ mm})$ の異なる種々のディスクロータを平行電極間(間隙3mm)の食用油(成



(a) 無負荷回転速度特性の測定



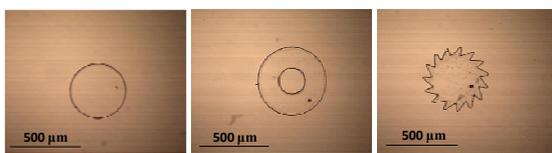
(b) 回転数-トルク特性の測定

図1 モータ特性の測定方法

分については、文献④参照)に浸し電場を印加し、その際の回転の様子を高速度ビデオカメラで撮影し画像解析ソフトを用いて非接触で回転数を測定して行った。

回転数-トルク特性の測定は、図1(b)に示すように、トルク測定のためにナイロン製のファイバーをディスクロータの中心に装着してDCモータでナイロンシャフトを介してロータを平行電極間(間隙5mm)の食用油に浸し設定回転数で回転させ、ロータにDC電場を印加した際のナイロンシャフトのねじれ角を高速度カメラで撮影して画像解析ソフトを用いて求めて行った。事前に測定したナイロンシャフトのねじれ角度-印加トルクの関係から発生トルクを算出した。

(2) 電界応答ポリマーからなるマイクロモータの回転制御特性: マイクロファブリケーションにより適したSU8のフォトレジストから成るエポキシ系電界応答ポリマーをロータとするマイクロモータをフォトリソグラフィ法によって創製して、そのモータとしての特性を把握しその可能性について検討する。ミクロンオーダーで直径と厚さの異なる図2に示す各種形状(円柱状、中空円柱状、ギヤ状)のディスクロータの誘電液体中での印加電場強度に対する無負荷回転速度特性を測定し、その特性のロータサイズや形状及び印加電場への依存性を明らかにする。



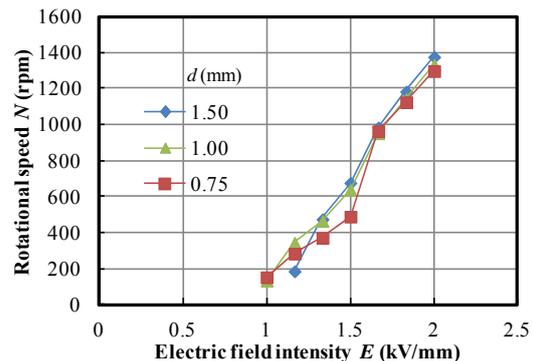
(a) 円柱状 (b) 中空円柱状 (c) ギヤ状  
図2 エポキシ系ポリマーからなるロータ

(3) 電界応答ポリマーコンポジットからなる簡易超小型マイクロモータの回転制御特性: (1)でのポリマーコンポジットからなるディスクロータの回転制御特性に関する研究成果に基づいて、円柱状のポリマーコンポジットロータ(直径 $d=1.0\sim 1.5\text{mm}$ 、高さ $l=1.0\sim 2.0\text{mm}$ )からなる一辺(電極間隙)3mmで高さ7mmの直方体をした簡易超小型マイクロモータを試作し、その印加DC電場に対するモータ特性を測定した。さらに、GND電極両サイドに二次的な電極を配置して、この電極の負極へのスイッチングにより偏向電場を発生させることによって回転方向を制御する方法を提案し、その効果を検証した。

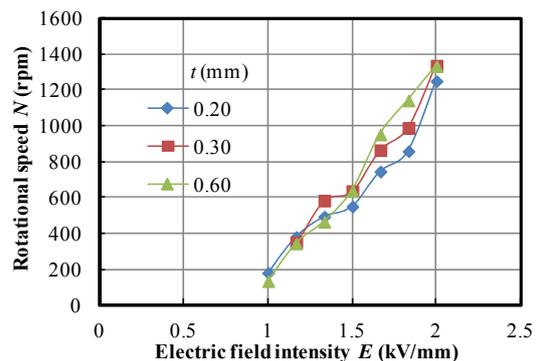
#### 4. 研究成果

(1) 電界応答ポリマーコンポジットロータからなるマイクロモータの回転制御特性: 図3には、無負荷時の印加電場強度 $E$ に対する回転数 $N$ の変化を測定した結果を示す。総じて、直径 $d$ と厚さ $t$ にかかわらず $E=1.0\text{kV/mm}$ 程度から回転し始め、 $E$ の増加に伴い回転数は増加し $E=2.0\text{kV/mm}$ で $N=1300\text{rpm}$ 程度とな

った。ディスクロータの厚さが増すと若干回転数が増加する傾向があるが、本実験での範囲でのディスクロータ直径と厚さの変化に対して有意な差異はなく、理論式から導かれるとおり、印加電場強度 $E$ のみに依存し、 $E$ が大きくなるにつれて $N$ はほぼ比例して増大することが確認できた。また、ディスクロータを構成するオキシ水酸化鉄とゼラチンの混合質量比 $m=1.00, 2.00, 2.67, 4.00$ と変えて、 $m$ が無負荷回転数特性に与える影響を調べた結果、オキシ水酸化鉄の混合割合を増やすと( $m$ 増大)、 $N$ が大きくなる傾向が確認できた。



(a) ディスク直径  $d$  への依存性



(b) ディスク厚さ  $t$  への依存性

図3 無負荷回転速度特性(印加電場 $E$ -回転数 $N$ の特性)

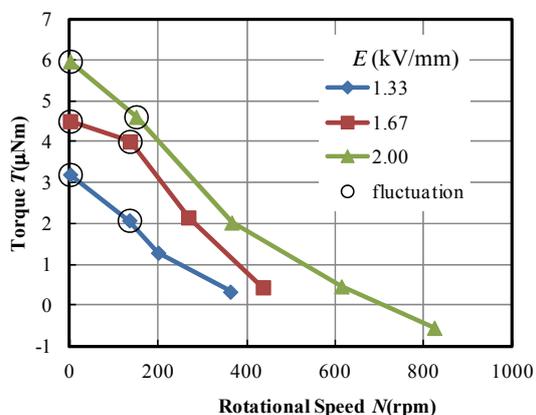


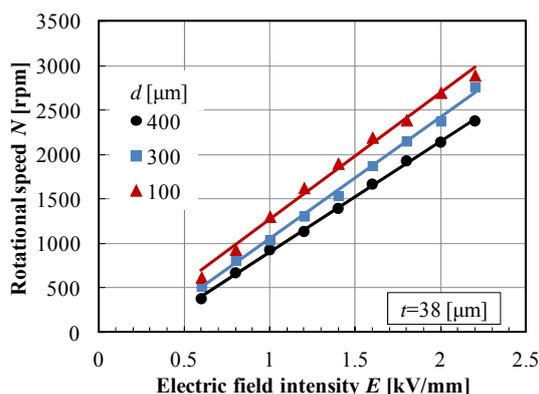
図4 回転数 $N$ -トルク $T$ 特性の印加電場強度 $E$ による変化

図4には、 $d=2.0$  mm、 $t=1.0$  mm、 $m=4$  のディスクロータの回転数  $N$ -発生トルク  $T$  特性の印加電場強度  $E$  への依存性を示す。発生トルク  $T$  は、印加電場強度  $E$  一定のもとでは回転数  $N$  の増加に伴い減少し、印加電場強度  $E$  が増加するにつれて回転数  $N$  の全範囲で増大する特性を示す。また、発生トルク  $T$  は、ディスクロータの厚さ及び直径が大きくなるほど増大する特性を示し、直径  $d=2.0$  mm、厚さ  $t=1.0$  mm のディスクロータにおいて  $E=2.0$  kV/mm で最大  $T=6.0$   $\mu$ Nm のトルクが得られた。

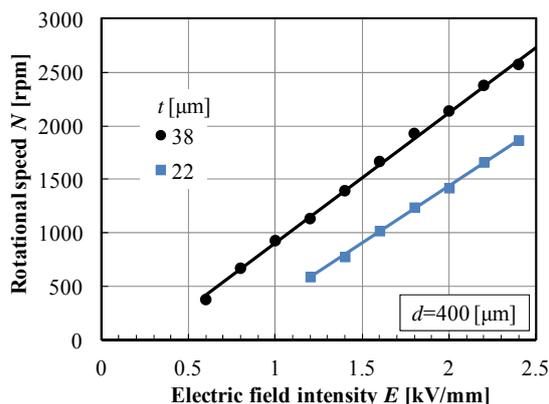
図4の回転数-トルク特性のトルク  $T$  の測定結果は、電場とディスクの電気分極による双極子モーメントで決まる電氣的に誘起されるトルク  $T_e$  から回転に伴ってディスクに作用する液体の粘性抵抗トルク  $T_h$  を差し引いたものである。そのため、液体の粘性抵抗トルク  $T_h$  を実測することにより、電氣的に発生するトルク  $T_e$  の特性を把握した。電氣的な発生トルク  $T_e$  は、本実験の回転数範囲内では回転数に対する低下割合がかなり小さくなることが明らかになった。このことにより、回転数の増大に伴う発生トルクの著しい低下は、誘電液体の粘性抵抗が主因といえ、発生トルク  $T$  を高い回転数まで維持するためには、粘度のより低い誘電液体を使用する必要があることを示唆できた。

(2) 電界応答ポリマーロータからなるマイクロモータの回転制御特性：図5には、円柱状ロータの印加電場強度  $E$  に対する回転数  $N$  の変化を、直径  $d$  と厚さ  $t$  が異なる場合について示す。厚さ  $t=38$   $\mu$ m 一定の場合 (図5 (a)) には、 $E=0.6$  kV/mm 程度の電場強度から回転し始め、回転数  $N$  は  $E$  の増加に伴ってほぼ比例して増大し、最大で 3000rpm (at  $E=2.2$  kV/mm) の高回転を呈する。かつディスク直径  $d$  が小さくなるほど高い回転数を示し、直径  $d$  への顕著な依存性があることがわかった。また、厚さ  $t$  に対しては (図5 (b))、同一電場強度では回転数は厚みが増すほど増大しディスク厚さへの強い依存性を示すことがわかった。以上のように、エポキシ系円柱状ロータの無負荷回転数は、(1) で述べた電界応答ポリマーコンポジットロータとは異なり、直径  $d$  及び厚さ  $t$  に強い依存性を示すことから、このディスクの回転をつかさどる電気分極にはイオンの拡散や移動が関与している可能性が示唆される。

円柱状ロータの無負荷回転数の直径  $d$  への依存性を図6に示す。本実験での直径  $d$  の範囲では、図に示したいずれの一定電場強度  $E=1.5, 2.0$  kV/mm においても、直径  $d$  が小さくなればなるほどほぼ比例して回転数は増大することがわかる。本実験では、 $d=100$   $\mu$ m が最小直径であったが、図6の比例関係から外挿すると、さらに小さくしてナノレベルのサイズにしても回転数はたかだか 200rpm 程度上昇するにすぎないことが推測できる。



(a) ディスクロータ直径  $d$  への依存性



(b) ディスクロータ厚さ  $t$  への依存性

図5 エポキシ系ポリマーロータの無負荷回転速度特性 (印加 DC 電場  $E$ -回転数  $N$  の変化特性)

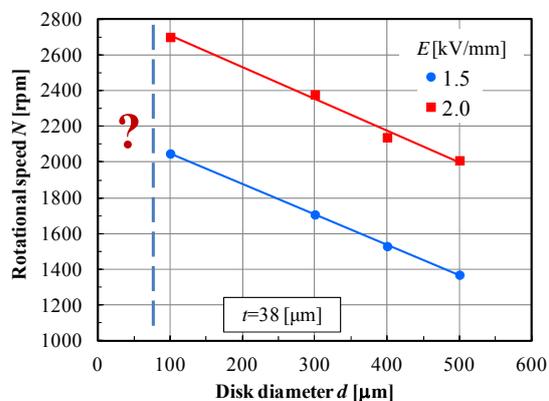


図6 回転速度  $N$  のディスクロータ直径  $d$  への依存性

中空円柱状ロータの内径  $d_2$  と外径  $d_1$  とは、中空率が 16% 一定となるように変化させている。図7には、厚さ  $t=38$   $\mu$ m 一定でサイズの異なる二種の中空円柱状ロータの電場強度に対する回転数の変化を示す。回転数は、円柱状ロータと同様に、電場強度にほぼ比例して増大し、同一の電場強度では、サイズの小さい中空円柱状ロータほど高回転数で回ることがわかる。

前述の円柱状及び中空円柱状ロータでは、回転方向は時計方向か反時計方向かにランダムに選定され定期的に回転する。実際にはこの回転方向を制御することが重要で、回転

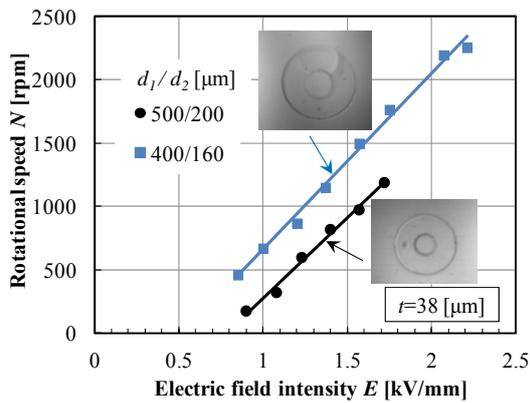


図7 中空円柱状ロータの無負荷回転速度特性

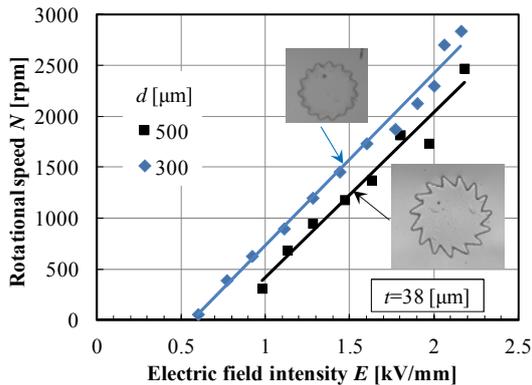


図8 ギャー状ロータの無負荷回転速度特性

方向を一方向に制御するために非対称の歯をもつ歯車状ロータを提案する。非対称の角度をもつ歯のために、ロータの回転方向は常に一方向(図8の  $d=500\mu\text{m}$  の場合で時計方向)であることを観察している。この歯車状ロータの場合も、回転数は電場強度にほぼ比例して増大するとともに、顕著なサイズ依存性を示し、同一の電場強度では直径  $d$  が小さいほど高い回転数を呈する。

(3) 電界応答ポリマーコンポジットからなる簡易超小型マイクロモータの回転制御特性：(1) の電解応答ポリマーコンポジットは、ミリサイズのロータの成形に適していることから、このコンポジットを円柱状ロータ(直径  $d=\phi 1.0, \phi 1.2, \phi 1.5\text{mm}$ , 高さ  $L=1.0, 2.0, 2.5\text{mm}$ ) とシナイロンシャフトをその軸に装着した電極間隙  $3\text{mm}$  で高さ  $7\text{mm}$  の直方体の簡易超小型マイクロモータを試作した(図9)。モータ内に充填する誘電液体として、食用油を用いている。その無負荷時の回転速度は、図10に示すように、印加電場強度  $E$  が大きくなるにつれてほぼ比例して増大する特性を示し、円柱状ロータの高さ  $L$  が短くなるほど回転数は高くなる。このロータ高さに対する変化傾向は、(1) での比較的高さ(厚さ)の低いディスクロータとは異なる特性を示しており興味深い。また、円柱状ロータの直径  $d$  の変化に対しては、一定電場強度

において  $d$  が小さくなるほど回転速度が速くなることを見出している。

回転方向の制御のために、図11に示すように、GND電極の両サイドに二次的な電極A, Bを配置して、この電極の負極へのスイッチングによる偏向電場によって回転方向を制御する方法を提案している。その結果、図11に示すように、二次電極AをGNDに短絡した場合には時計方向に、二次電極BをGNDに短絡した場合には反時計方向に回転することを確認できた。それぞれ10回の試験で、A短絡が90%の確度で時計方向に、B短絡が100%の確度で反時計方向に回転する結果を得ており、モータの製作誤差等の影響を考慮しても、本研究で提案する回転方向制御方法は十分効果があるといえる。

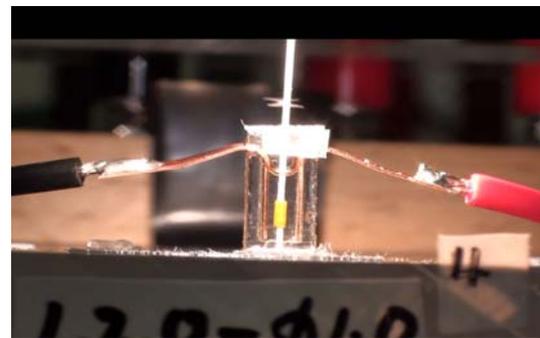


図9 試作した簡易超小型マイクロモータ(ケース：電極間隙  $3\text{mm}$ , 高さ  $7.0\text{mm}$ , ロータ：直径  $d=\phi 1.0\text{mm}$ , 高さ  $L=2.0\text{mm}$ )

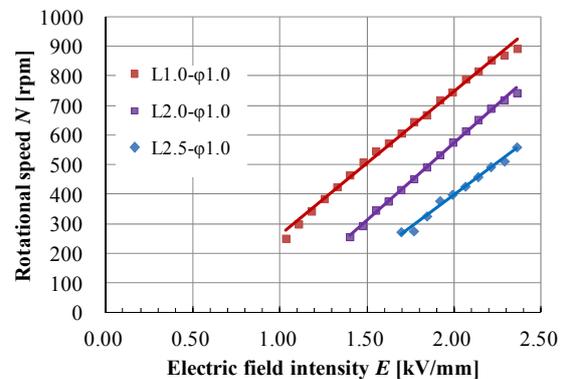
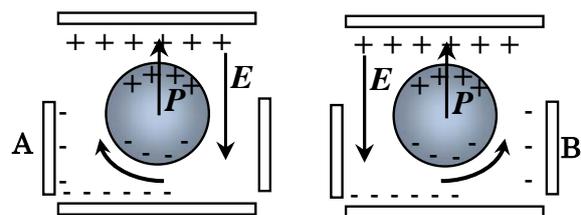


図10 超小型マイクロモータの無負荷回転速度特性(円柱ロータの直径  $d=\phi 1.0\text{mm}$  一定、高さ  $L=1.0, 2.0, 2.5\text{mm}$  可変)



(a) 偏向電極A短絡 (b) 偏向電極B短絡

図11 二次電極A, Bによる回転方向制御

<引用文献>

- ① T.B. Jones, Quincke Rotation of Spheres, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-20, No.4, (1984), pp.845-849.
- ② N. Pannacci, et al., How Insulating Particles Increase the Conductivity of a Suspension, Physical Review Letters, PRL 99, Article No.094503, (2007), pp. 1-4.
- ③ F. Peters, et al., Size Effect in Quincke Rotation : A Numerical Study, The Journal of Chemical Physics, Vol. 130, Article No.194905, (2009), pp.1-8.
- ④ M. Zrinyi, M. Nakano, T. Tsujita, Electrorotation of Novel Electroactive Polymer Composites in Uniform DC and AC Electric Fields, Smart Materials and Structures, Vo. 21, Article No.065022, (2012), pp.1-6 .

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

- ① 中野政身, 奥村剛行, 戸塚厚, Zrinyi Miklos, 誘電液体中の一様 DC 電場下で回転する EAP コンポジットロータからなるマイクロモータの特性, 日本 AEM 学会誌, 査読有, (2016), Under review.
- ② R.A. Bauer, L. Kelemen, M. Nakano, A. Totsuka, M. Zrinyi, Fabrication and electrorotation of a novel epoxy based micromotor working in uniform DC electric field, Smart Materials and Structures, 査読有, Vol.24, No.10, Article No.105010, (2015), pp.1-5.  
DOI:10.1088/0964-1726/24/10/105010

[学会発表] (計9件)

- ① 中野政身, 奥村剛行, 戸塚厚, Zrinyi Miklos, 誘電液体中の一様 DC 電場下で回転する EAP コンポジットロータからなるマイクロモータの特性, 日本 AEM 学会 MAGDA2015 in Tohoku—電磁現象及び電磁力に関するコンファレンス—講演論文集, 2015 年 11 月 12 日, 仙台, pp.341-346.
- ② M. Zrinyi, M. Nakano, Polymer Rotor for Micro-Electromotor, Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2015), 2015 年 10 月 28 日, Sendai(Japan), pp.138-139.
- ③ M. Nakano, A. Totsuka, T. Ambo, R.A. Bauer, L. Kelemen, M. Zrinyi, Electrorotation of Epoxy Based Microrotors in Dielectric Liquid under Uniform DC Electric Field, Proceedings of the 17th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics (ISEM2015), 2015 年 9 月 17 日, Hyogo (Japan), Paper No. 2P2-F-3, pp.1-2.
- ④ 中野政身, 戸塚厚, 安保多美子, Zrinyi Miklos, 誘電液体中のエポキシ系電界応答ポリマーロータからなる一様 DC 電場下で作動するマイクロモータ, 日本フルードパ

ワーシステム学会・平成 27 年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集, 2015 年 5 月 28 日, 東京, pp.58-60.

- ⑤ M. Nakano, Micro-Motor of Electro-Active Polymer Composite Rotor in Dielectric Liquid, 2015 ELyT Workshop, 2015 年 2 月 19 日, Matsushima (Japan), p.2
- ⑥ M.Zrinyi, R.A. Bauer, L. Kelemen, M. Nakano, Novel Electroactive Polymer for Micro-motor Development, International EAP Workshop 2014, Electromechanically Active Polymer (EAP) Transducers and Artificial Muscles, 2014 年 11 月 25 日, London (UK)
- ⑦ M. Zrinyi, M. Nakano, Development of Micro-Motor using Electrorotation of Smart Polymer, Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2014), 2014 年 10 月 9 日, Sendai (Japan), pp.114-115.
- ⑧ M. Nakano, T. Okumura, M. Zrinyi, Micro-Motor Consisting of Electro-Active Polymer Composite Rotor in Dielectric Liquid, USB Proceedings of Eleventh International Conference on Flow Dynamics (11<sup>th</sup> ICFD2014), 2014 年 10 月 9 日, Sendai (Japan), pp.406-407.
- ⑨ M. Zrinyi, M. Nakano, Novel Electroactive Polymer for Micro-Motor Development, USB Proceedings of Eleventh International Conference on Flow Dynamics (11<sup>th</sup> ICFD2014), 2014 年 10 月 9 日, Sendai (Japan), pp.404-405.

[その他]

ホームページ等

- ① M. Zrinyi and M. Nakano, The 34th issue the WW-EAP Newsletter: EAP Polymer Rotor for Micro-Electromotor, Vol. 17, No. 2, (2015-12), pp.15-15.  
URL:[http://ndea.jpl.nasa.gov/nasa-nde/newsltr/WW-EAP\\_Newsletter17-2.pdf](http://ndea.jpl.nasa.gov/nasa-nde/newsltr/WW-EAP_Newsletter17-2.pdf)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中野 政身 (NAKANO, Masami)  
東北大学・流体科学研究所・教授  
研究者番号 : 40147947

(2) 研究分担者

戸塚 厚 (TOTSUKA, Atsushi)  
東北大学・流体科学研究所・技術専門職員  
研究者番号 : 40626313