

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月21日現在

機関番号：34310

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H06125

研究課題名(和文) 定常電場下で駆動する直流型ナノ・マイクロモーターおよびポンプの創出

研究課題名(英文) Micro/nanomotor system driven under stationary DC electrostatic field

## 研究代表者

山本 大吾 (YAMAMOTO, Daigo)

同志社大学・理工学部・准教授

研究者番号：90631911

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、粘性によるエネルギー散逸が極めて大きくなるマイクロ領域においても効率的かつ安定に動力を供給しうる新しい基盤技術を提示し、微小空間で駆動する極めてシンプルなモーターやポンプのプロトタイプを作製することを目的とした。マイクロ空間において円錐型の電極間に粒子を設置し、直流電圧を印加すると粒子は周期運動を行う。本研究では、粒子形状および電場によって運動モード・運動速度を制御可能であることがわかった。また、周期運動を行っている際の電流値測定によって、粒子は電極に接触する度にサブピコアンペアレベルの電子の授受を行っていることがわかった。

## 研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題によって得られた知見を基にすることで、マイクロモーターやポンプといったマイクロデバイスの動力源としての実用化の可能性が広がると考えられる。本システムの現在の問題点は、安定な運動を取り出すためには100 V程度の高い印加電圧が必要なところにある。しかしながら、今後システムをダウンサイジングすることで電場を強化し、乾電池程度(数ボルト)の微弱な直流電圧で安定な運動を取り出すことができれば、低消費電力で扱いやすい次世代の革新的マイクロデバイスの開発に貢献できると考えられる。

研究成果の概要(英文)：Unlike currently a macro-motor system, a micro-motor system needs to work in a smaller space where viscous effect is much larger.

In this study, we proposed a simple micro-motor system wherein a micro-particle exhibits a cyclic motion continuously in silicon oil under DC electric field. We found that a micro-particle exhibits various types of cyclic motions depending on its shape, and that the speed is controlled by strength of electric field. We also investigated relationship between its cyclic motion and electric current to elucidate the motion mechanism.

研究分野：コロイド・界面化学

キーワード：マイクロモーター マイクロポンプ 直流電場

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

生体内では、ナノスケールのシステムが等温条件下で、化学エネルギーを効率的に運動エネルギーに転換している。例えば、体内に遍在しているナノモーターは反応によって得られたエネルギーを用いて、目的の場所へ生命活動に必要な物質を輸送している。一方、人類がこれまでに開発してきた、等温系で化学エネルギーから仕事を取り出す仕組みとしては、電池でモーターを動かす系がある。基本的な直流型モーターでは、電磁場中で誘起されるローレンツ力によって一方向にトルクを生み出す仕組みを構築している。この動作原理に基づいてナノ～マイクロスケールまでダウンサイジングしたとしても、慣性と粘性の比で表されるレイノルズ数が非常に小さくなり、パーツ間の粘性摩擦によるエネルギー散逸によって仕事効率が著しく低下する。また、生体内のナノスケールの動力源の例として、細胞膜の内外を繋ぐイオンポンプがあるが、膜電位を駆動力としてイオンの流れを生じさせることが可能であり、その電位差はわずか数十～百ミリボルトの微弱な直流電圧であることが知られている。一方で、現在、実用化が見込まれているマイクロ流体デバイスへの人工的な送液システムとしては、流路の外側から送液ポンプによって流体を注入するのが一般的であるが、この時、流路幅の二乗に反比例した大きな圧力損失が生じる。そのため、流路幅が小さくなるほど大きな負荷がかかることになり、装置の変形や破壊に繋がってしまう。生体内のイオンポンプに倣えば、流路内にマイクロポンプを設置することで内部流を発生させる必要がある。

このように、我々の生命活動を支える体内のナノモーターやイオンポンプは、シングルナノメートルサイズという極めて微小な動力システムであり、人類が開発してきた微細加工技術を以てしても現段階では遥かに及ばない領域である。そのため、生体内で日常的に行っているような等温系でのマイクロなエネルギー変換・仕事の取り出しは、未解明の課題であり、技術としての有効利用も実現していない。しかし、生体内で効果的に機能しているナノサイズのシステムがある限り、ナノテクノロジーが目指すべき最終到達点は、これらのシステムと少なくとも同等のサイズ・性能を有する革新的なデバイスを人工的に創成することになるだろう。今後、微細加工技術の進展に伴ってナノレベルでのデバイス設計が可能となった場合、ナノロボットの動力源となるナノモーターや、ナノチャネルに送液可能なナノポンプの革新的な動作原理の確立は必要不可欠であり、設計の観点から考えても、シンプルなメカニズムで駆動する動力システムに関する基盤技術を創出することが重要であると考えられる。

### 2. 研究の目的

微細加工技術の進展に伴って、ナノ～マイクロスケールのデバイスの作製が可能となりつつある。このようなマイクロなデバイスの実現には効率的な動力源を供給することが重要であり、微小空間で駆動するモーターや微小流路に送液可能なポンプの開発が望まれている。しかしながら、マイクロスケールではレイノルズ数が極めて小さく、慣性よりも粘性が支配的となるため、従来のマクロなモーターやポンプを単純にダウンサイジングする手法では、仕事効率は著しく低下すると考えられる。本研究課題では、粘性によるエネルギー散逸が極めて大きくなるマイクロ領域においても効率的かつ安定に動力を供給しうる新しい基盤技術を提示し、微小空間で駆動する極めてシンプルなモーターやポンプのプロトタイプを作製することを大目的とする。

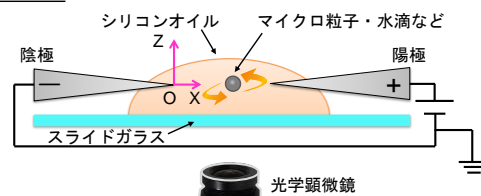
### 3. 研究の方法

本研究課題では、形状を制御した単成分の固体粒子・微小液滴を用いて、定常直流電場下で周期運動を示す極めてシンプルなマイクロ動力システムについて検討を行った。実験装置の概略図を図1に示す。アニオン性界面活性剤を含むシリコンオイル中に分散しているマイクロ粒子・微小水滴に対して円錐型のタングステン電極を用いて、一定の直流電圧を印加し、光学顕微鏡を用いて粒子の挙動を観察した。陰極の先端を原点と定め、各電極は、垂直方向には図1aのように同じ高さで、水平方向には図1bのように配置した。

本研究課題によって得られた研究成果の中で、本稿で紹介したい研究内容は以下の3項目である。

- (1) 球形粒子やそれらが連結した比較的構造の単純な粒子において、電圧・電極配置などの操作因子を変化させて粒子の周期運動に与える影響を調べた。
- (2) 周期運動が生じている際の電流値変化を測定し、周期運動が発生するメカニズムを検討した。
- (3) 粒子形状に特徴のある粒子を用いることで、動力源としての応用が見込める高性能なマイクロモーターやポンプのプロトタイプの作製を目指した。

(a) Side View



(b) Top View

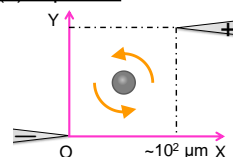


図1 定常直流電場下で駆動するシンプルなマイクロ運動システムの装置概略図。

#### 4. 研究成果

##### (1) 球形粒子およびそれらが連結した凝集体の運動特性

図 2a, b に印加電圧 130 V および 180 V における球形ポリスチレン粒子の周期運動の様子を示す。安定した周期的な公転運動が発生し、その運動の持続時間は 30 分間にも及んだ。図 2c に示すように、印加電圧の増加にしたがって公転の回転速度が増大したが、この粒子の公転速度は、印加電圧や電極配置といった電場の状態に強く依存して変化することを確認した。周期運動の発生を促す印加電圧には閾値が存在し、図 2 のような電極配置の場合では約 100 V を境界にして停止していた粒子が周期運動を開始した。また、電圧を下げていった場合に運動が停止する閾値が、運動発生の閾値とは異なるといったヒステリシスが起ることがわかった。以上の結果から、粒子の回転速度は電場を制御することでコントロールできることがわかった。

また、本運動システムについて粒子形状の影響を調べるために、上述の球形粒子が二個連結した凝集体(ダイマー粒子)の運動を観察した(図 3)。図 3a, b の印加電圧の条件では、ダイマー粒子は、粒子対の重心の位置がほとんどぶれずに、その場でスピンする自転運動が確認された。この運動は、回転軸を必要としないことから、摩擦によるエネルギーロスを軽減できると考えられる。一方で、図 3c のように電圧を上げていくと、自転運動から公転運動へと運動モードが転移した。図 4 には印加電圧の違いによる運動モードの変化を表す相図を示す。図より、ダイマー粒子の場合には、電圧の大きさによって運動モードを制御できることがわかった。

##### (2) 粒子の周期運動と電極間を流れる電流値の相関性の検討

周期運動が発現するメカニズムを調査するために、単純な振動運動が発現しやすく形状が真球となる微小水滴をマイクロ粒子として用いて針状電極間の周期運動と電極間を流れる電流の関係性を調べた。図 4 に本実験系における微小水滴の振動運動の典型例を示す。図 4a より水滴は陰極から陽極に向かって移動し(0.00~0.35 s)、陽極に触れた後に陽極から陰極に向かって(0.35~0.90 s)戻っていく振動運動の様子がわかる。図 4b のグラフにおいて、陰極を始点とする水滴の変位を実線、電極間に流れる電流値の相対変化を破線で示している。図 4b より水滴が極めて安定した振動運動をしたことを示しており、その振動周期は 1 秒程度であった。このような振動運動に関して、回路に電流計を接続しただけの単純なシステムを構築し、電流値を測定したがノイズが多く見られ、測定の信頼性は低いものだった。そこで、装置全体を静電シールドで覆い、通常検出困難なサブピコアンペアオーダーの電流値変化を測定できる装置を構築し、電流値の測定を行なった。その結果、静電シールドの効果で、周囲の機器による誘導起電力で発生するノイズがグラウンドに流れたため、精度よく電流の経時

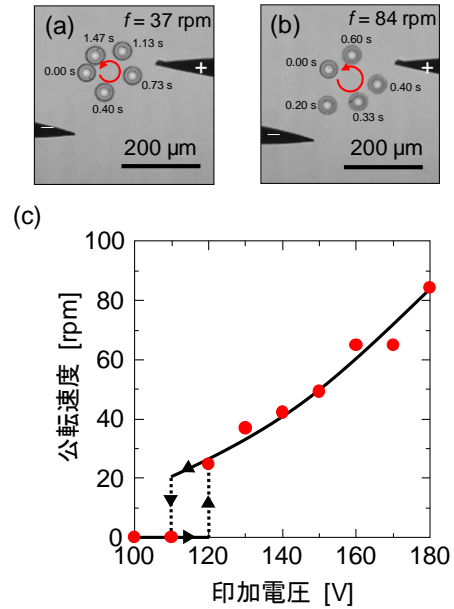


図 2 球形粒子の周期運動の様子。印加電圧によって公転速度を制御できることがわかる。

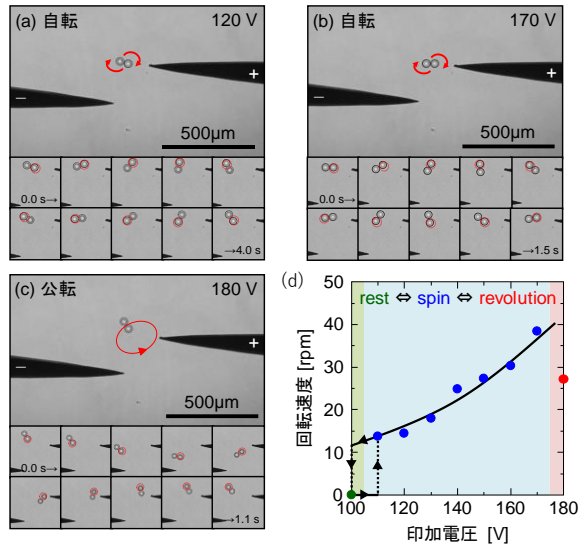


図 3 ダイマー粒子の周期運動。非球形粒子を用いることで、新たな運動モードとして自転運動が発現した。また、印加電圧を大きくしていくと運動モードが公転運動へと変化する。

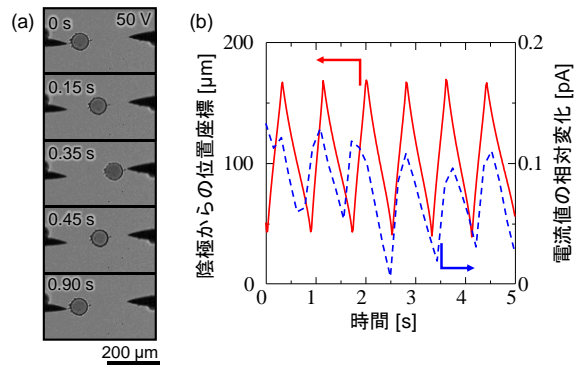


図 4 液滴の振動運動と電極間を流れる電流値の相関。陽極に接触したときに電流値がサブピコアンペアオーダーで上昇していることがわかる。



変化を測定できるようになった(図4b破線)。図4bに示した結果から電流値は振動周期と同じ周期を持っており、水滴が陽極に最も近づく時にピークを迎えていることがわかった。

また、サブピコアンペアオーダーの電流値の測定では他機器からの誘導起電力を完全に無視することはできず、電流値の相対変化は測定できたものの、実際に流れる電流値の絶対値は測定することができなかつた。そこで、絶対値を以下の方法によって見積もった。微小水滴の振動運動を観察する過程で時間経過とともに水滴は次第に小さくなることが確認された。これは水滴が電極に接触する過程で、電極間との電子の授受を行い、電気分解した結果であると考えられる。水滴の体積変化から電流値を算出したところ、数十マイクロアンペア程度の電流値が流れていることが確認された。以上のことから、電極間では数十マイクロアンペア程度の電流値が流れているものの、サブピコアンペアオーダーでの電荷の授受が液滴/電極間で行われていることがわかり、これが周期運動の発現に寄与しているのではないかと考えている。

### (3) マイクロモーターやポンプのプロトタイプ製作

本研究課題では、球形粒子が連結した凝集体の他、ロッド状粒子、歯車状粒子、手裏剣粒子、コイル状粒子など様々な特徴的な形状を有する粒子についても検討を行っている。その結果、それぞれ形状によって特有の運動モードを示すことがわかった。特に興味深かった周期運動の代表例を図5に挙げる。図5aは球形粒子が三個連結した凝集体(トリマー粒子)であるが、~100 rpm という比較的速度の速い自転運動を行っており、粒子が自転運動をする際に、粒子周りで媒質の流れ(~3 mm/s)が発生していることも確認できた。また、図5bは左巻きコイルの長軸周りの回転運動(コークスクリュー回転)の様子であるが、粒子の素材(金属、有機物)によってコイルの回転方向が異なるという結果が得られた。これらの特徴的な特性を利用すれば、マイクロモーターやポンプといったマイクロデバイスの動力源としての実用化の可能性が広がると考えられる。

本システムの現在の問題点は、安定な運動を取り出すためには~100 V という高い印加電圧が必要なところにある。しかしながら、本系では電圧よりむしろ電場の大きさが重要な操作因子として考えられる。本研究課題によって得られた知見を基に、今後システムをダウンサイジングすることで、乾電池程度(数ボルト)の微弱な直流電圧で安定な運動を取り出すことができれば、低消費電力で扱いやすい次世代の革新的マイクロデバイスの開発に貢献できると考えられる。更に、上述のようなマイクロモーターやポンプはナノエレクトロニクスの発展に寄与するのみにあらず、生体内のモーターたんぱく質やイオンポンプなどの動力システムの物理的性質を理解するためのモデルとしても有用であると考えられ、バイオミメティクス分野においても波及効果をもたらすものと期待している。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

- ① [D. Yamamoto](#), K. Kosugi, K. Hiramatsu, W. Zhang, A. Shioi, K. Kamata, T. Iyoda, K. Yoshikawa, Helical micromotor operating under stationary DC electrostatic field, *The Journal of Chemical Physics*, 査読有, vol. 150, 2019, 014901 (6 pages)  
DOI: 10.1063/1.5055830
- ② [D. Yamamoto](#), R. Yamamoto, T. Kozaki, A. Shioi, S. Fujii, and K. Yoshikawa, Periodic Motions of Solid Particles with Various Morphology under a DC Electrostatic Field, *Chemistry Letters*, 査読有, vol. 46, 2017, pp.1470-1472  
DOI: 10.1246/cl.170622

[学会発表] (計9件)

- ① 柿本 一郎, 神崎 敬浩, 小杉 健斗, 張文 煜, 名和 愛利香, 山本 大吾, 吉川 研一, 塩井 章久, 油中直流電場下における微粒子の周期運動, 粉体工学会 2018 年度秋期研究発表会, 2018
- ② W. Zhang, T. Kozaki, I. Kakimoto, [D. Yamamoto](#), A. Shioi, K. Yoshikawa, Periodic Motions of Micro Particles in Oil Phase Under a DC Electric Field, 13th Korea-Japan Symposium on Materials and Interfaces (国際学会), 2018
- ③ W. Zhang, T. Kozaki, I. Kakimoto, K. Kosugi, [D. Yamamoto](#), A. Shioi, S. Fujii, K. Kamata, T. Iyoda,

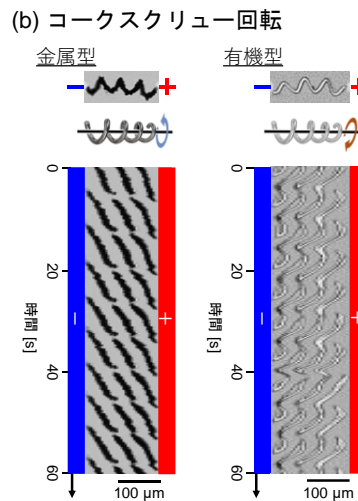
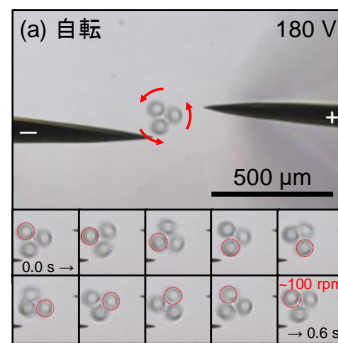


図5 非球形粒子の特徴的な周期運動の代表例。(a)は、トリマー粒子が対流を伴って高速回転をする様子を示し、(b)はコイル状粒子が材質によって方向の異なるコークスクリュー回転を行う様子を示している。

and K. Yoshikawa, Various Motions of Micro Particles Under a DC Electric Field: An Approach to Make Electric Micro-Motor in Millimeter Scale, The first international conference on 4D materials and system (国際学会), 2018

④ W. Zhang, K. Kosugi, D. Yamamoto, A. Shioi, S. Fujii, T. Iyoda, K. Yoshikawa, Corkscrew Motion of Microhelixes under Stationary DC Electric Field, IUMRS-ICAM 2017 (国際学会), 2017

⑤ W. Zhang, K. Kosugi, D. Yamamoto, A. Shioi, S. Fujii, K. Kamata, T. Iyoda, K. Yoshikawa, Corkscrew Motion of Microhelixes Depending on Chirality under DC Electric Field, Chirality 2017 (国際学会), 2017

⑥ 小杉健斗, 山本大吾, 塩井章久, 吉川研一, マイクロ空間で駆動する直流型マイクロコイルの運動メカニズムの解明, 第19回化学工学会学生発表会, 2017

⑦ W. Zhang, K. Hiramatsu, K. Kosugi, D. Yamamoto, A. Shioi, K. Yoshikawa, Behaviour of a micro coil under a DC electric field, 12th Japan-Korea Symposium on Materials and Interfaces (国際学会), 2016

⑧ 小杉健斗, 平松和也, 山本大吾, 塩井章久, 鎌田香織, 彌田智一, 吉川研一, 直流電場下で駆動する微小コイル型モーター, 第77回応用物理学会秋季学術講演会, 2016

⑨ 平松和也, 小杉健斗, 山本大吾, 塩井章久, 吉川研一, 直流電場下における油相中のマイクロコイルの周期運動, 化学工学会 第48回秋季大会, 2016

## 6. 研究組織

### (1)研究分担者

なし

### (2)研究協力者

研究協力者氏名: 塩井 章久

ローマ字氏名(SHIOI, Akihisa)