

令和 2 年 4 月 24 日現在

機関番号：34310

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2019

課題番号：16K13655

研究課題名(和文)非線形ダイナミクスを活用したマイクロ運動機関の創出

研究課題名(英文)Construction of micro-mechanical machine based on nonlinear dynamics

研究代表者

吉川 研一 (Kenichi, Yoshikawa)

同志社大学・研究開発推進機構・客員教授(嘱託研究員)

研究者番号：80110823

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：非線形特性を活用して、cm-mmのレベルで滑らかな仕事をさせることが可能であるような、運動機関の創出を目指して研究を進めた。1) 直流電場で働く回転モータ・流体ポンプ：プラスチックの球状粒子に直流電位を印加したところ、電極の配置に対して、二巻きのロール状の回転運動が生じることなどを発見した。2) 光照射による物体運動制御・流体ポンプ：油水混合溶液の組成を相分離の臨界点近傍の均質な状態に設定し、一点にレーザ照射すると、マイクロ液滴が湧出し、一方向の定常的な流れが引き起こされることを明らかにしている。3) 常温での化学運動エネルギー変換システム：複数の液滴が同期して拍動運動を起こすことを見出している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

20世紀初頭、Einsteinは、Brown運動の理論を構築したが、これは線形非平衡の枠組みであった。近年、Jarzynskiが、線形関係の破れが、仕事の効率の限界に直接関係することを示すなど、非平衡物理学は発展してきている。しかしながら、マイクロなスケールで、高効率で運動する機械を創出するといった、基本的な課題については未だ初歩な段階に留まっている。本研究では、非線形特性を活用することにより、マイクロスケールの「ゆらぎ」から、マクロな秩序運動をとりだすといったことをターゲットにして、国際的にみても先導的な研究を進めることができている。

研究成果の概要(英文)：The target of the present study is to construct micro-scaled mechanical machine with the scale of micrometer to centimeter. The main results are summarized as follows: 1) Rotational motor driven by constant DC voltage. Construction of rotational motion of sub-millimetre scale working in an organic solvent. 2) Photo induced fluid pumping and rotary motion. 3) Self-propelled motion induced by chemical potential under isothermal condition. It was found that cm-sized organic droplets undergo synchronized motion, both up-down motion and translational motion.

研究分野：非線形科学、生命物理学

キーワード：マイクロ直流モータ 直流ポンプ 非線形発振 limit cycle 分岐現象 無接点モータ 化学-機械エネルギー変換 光振り子

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

20世紀初頭、Einstein は、Brown 運動の理論により、メソスコピックな階層（マイクロシステム）での物理法則の特徴に注目した。この研究は、その後、揺動散逸定理として結実し、線形非平衡の物理学が出来上がっている。しかしながら、このような理論体系は、熱力学的な開放系では崩れ、揺動と散逸の線形関係も破綻する。近年、Jarzynski が、線形関係の破れが、仕事の効率の限界に直接関係することを示すなど、非平衡物理学は着実に発展してきてはいる。しかしながら、マイクロなスケールで、高効率で運動する機械を創出するといった、基本的な課題については未だ初歩な段階に留まっている。本申請者は、非線形特性を活用することにより、マイクロスケールの「ゆらぎ」から、マクロな秩序運動をとりだすといったことをターゲットにして、国際的にみても先導的な研究を、これまでに展開してきている。

2. 研究の目的

これまでに人類が開発してきた運動機関は、カルノーサイクルなどの熱機関や電磁モータに代表されるように、“硬い部品”を組み合わせて機械を組み立て、“ゆらぎ”を抑えながら仕事を取り出すことが基本となっている。一方、生体の運動機関は、nm スケールの“柔らかな分子機械”の“ゆらぎ”運動を、マクロスケールの規則運動に転化している。本研究では、“非平衡ゆらぎ”に潜む非線形特性を活用して、cm-mm のレベルで滑らかな仕事をさせることが可能であるような、運動機関の創出を目指す。1) 直流電場で働く回転モータ・流体ポンプ 本申請者らは、直流電場のもとで数十 μm 程度のサイズの誘電体が、両電極の間を自律的に往復運動するといった現象を見出している。両電極の位置を適切に配置することにより、誘電体は回転運動を行うようになる(Phys.Rev.E 2013 など)。これは、外部から電位のスイッチングをおこなうことなく、回転モータが作られると言った点で、新規性の高い実験系となっている。このような研究を飛躍的に発展させ、ミクロの世界で効率良く働く運動機関の構築をめざす。2) 光照射による物体運動制御・流体ポンプ 光照射により界面不安定を引き起こし、cm スケールの物体の規則的な運動を誘起させることが可能であることを、これまでに報告してきている(J.Chem.Phys.2014 など)。本研究では、特に光触媒を組み込んだ実験系を構築し、界面不安定性が引き起こす自律運動についての実験的研究を中心に研究を進める予定である。3) 常温での化学運動エネルギー変換システム 申請者らは、化学的非平衡性条件下、cm スケールの液滴や固形物が規則的な運動を引き起こすことを見出し、系統的な研究を進めてきている。そのメカニズムとして、非平衡ゆらぎの非線形結合により生じることを、吉川らは解明してきている(Nature Comm.2015, Nanoscale 2015 など)。本研究では、酸化・還元などの化学反応によって誘起される界面不安定性を活用し、実空間上マクロなスケールで自己運動系を構築することを大きな目標として掲げている。

3. 研究の方法

非平衡開放条件下での自律運動に関する実験系に関する研究を総合的に進める。1) 直流電場で働く回転モータ・流体ポンプ、2) 光照射による物体運動制御・流体ポンプ、3) 常温での化学運動エネルギー変換システム。このような実験と並行させて、非平衡ゆらぎが自律運動に発展するメカニズムを理論的に定式化することを試みる。このようにして新たに構築した数理モデルにより、自律運動の分岐モードの解析や、あらたな運動モードについての予想などを進める。数理モデルでの予想を、実空間モデルで検証し、実験と理論との対比により、理論の更なる深化を図り、マイクロな系での自律運動の設計原理の確立を目指す。各々の課題に関してより具体的な方法について次に説明する。1) 直流電場で働く回転モータ・流体ポンプ: 固形物体の素材や形状を変化させて、運動モードの変化を調べる。回転対称や反転対称性の破れた構造や、鏡像対称性の破れにより、多様な規則的運動の生成が可能となるものと期待される。また、予備的な実験により、Au などの金属のマイクロ粒子でも、往復運動や回転運動を引き起こすことが可能であることが明らかになりつつある。これらの実験結果に基づき、どのような実験系が直流電場下で回転運動の生成に最も有効であるかを明らかにしたい。また、逆ミセルによる媒質の流体運動の実験系は、可憐な流体ポンプとしての発展が考えられる。この方向の研究も重視する。2) 光照射による物体運動制御・流体ポンプ: 流体ポンプを目指す研究に加えて、マイクロサイズの固形物体についての規則的運動の発生の研究を進める。すでに、アルミニウムなどの金属薄膜から、適当な形状を切り出し、液面上に浮遊した状態で、局所的にレーザを照射すると、振り子運動をひき起こることが可能であることを予備的な実験により確認済みである。これまでにないような、光誘起の運動体の構築を進めていきたい。3) 常温での化学運動エネルギー変換システム: マイクロな金属触媒を用いた、化学反応によって駆動される運動体の研究を大きく発展させるとともに、液滴の運動系についての実験も発展させたい。すでに予備的な実験により、アンモニアや塩酸ガスなどの刺激ガスに反応して、正や負の走化性をしめるような液滴系をつくるのが可能であることを確認している。また、溶液中の化学物質に反応して、正や負の走化性を示すような実験系の構築も目指す。

4. 研究成果

1) 直流電場で働く回転モータ・流体ポンプ: ミクロ水滴を、プラスチックの球状粒子に置き換えて実験を進めたところ、電極の配置に対して、二巻きのロール状の回転運動が生じることを発見した。0.1 μm 以下のスケールの逆ミセルが、電極近傍で荷電のスイッチングを起こすことが、媒質のロール状対流運動を引き起こしていると推測される。このような、二巻きのロール状の回転運動は、電極近傍で弱く荷電が正や負に注入された媒質が静電場の中で、流体運動を引き

起こし、この流体運動に乗ることで固形物体が運動しているといったような、メカニズムが考えられる。これを実証するために、電極近傍で荷電が移動する効果を取り入れた流体の運動モデルの simulation を行い、実際に実験で観測された運動モードが生じることを理論的にも確かめている (J.Chem.Phys.2016)。これらに付け加えて、定常的な直流電場のもと、 μm スケールのコイル状の物体が安定な、長軸周りの回転運動を引き起こされることを見出している。

2) 光照射による物体運動制御・流体ポンプ：油水混合溶液の組成を相分離の臨界点近傍の均質な状態に設定し、溶液中の一点にレーザー照射すると、マイクロ液滴が湧出する。レーザー焦点の近傍で容器に空間的な異方性を導入すると、一方方向の流れが引き起こされる。これは、マイクロ相分離が生じた部分で局所的な圧力上昇が生じるためである。このような新規な光ポンプは、流体中に気泡などを生じさせることなく安定に一方方向の流れを引き起こすといった特性があり、今後の研究の展開が期待される。(J.Phys.Chem.Lett.2018)。さらに、光照射により、cm サイズの固形物体(シート)の定常的な振り子運動や、回転運動を引き起こることができることも、論文として報告している (J.Phys.Chem. C, 2018)。この方向の研究を更に発展させ、金ナノ粒子が溶解した水溶液の、気水界面に対して平行にレーザー光を照射すると、光の進行方向(正の方向)に流体運動が生じることを明らかにした。レーザーの照射角度を変えて、気水界面で全反射が生じる条件にすると、光源方向(負の方向)に流体運動が生じることが分かった。すなわち、照射角度を変えることにより、流体運動の方向性を逆転できることを発見した。このような流体運動の運動方向の反転現象のメカニズムを明らかにするために、Navier-Stokes 方程式を援用してシミュレーションを行い、実験結果を理論的に再現することができている。すなわち、熱 Marangoni 効果が、運動をひき起こしていることを解明している。更に重要な実験結果として、固形物体を気水界面に浮遊させ、レーザーを照射すると、正と負の方向に、進行方向をスイッチングできることも明らかにしている。

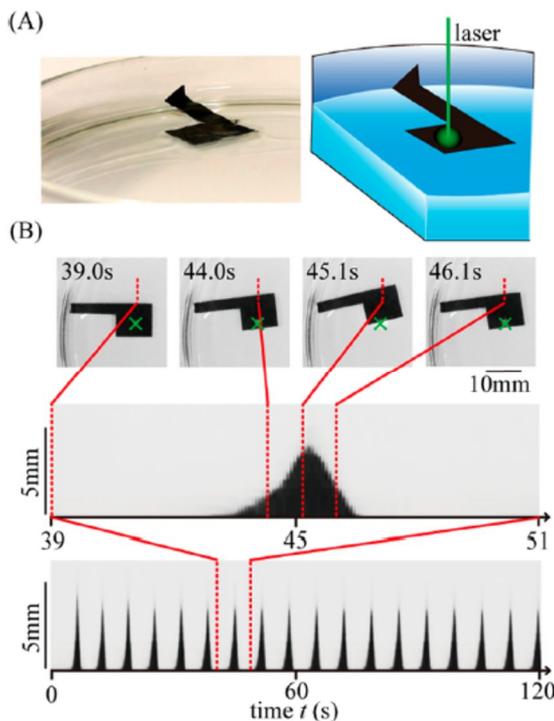


図1 レーザ照射による振り子運動の生成 (J.Phys.Chem. C, 2018)

3) 常温での化学 運動エネルギー変換システム：生物が示す走化性に注目して、ガスに対して同様の 振る舞いを見せる液滴系を発見した。酸性であるオレイン酸の cm サイズの液滴に塩基性のアンモニアをガス刺激として与えると液滴はガス刺激から逃げる方向に 運動した(負の走化性)。オレイン酸とアンモニアの間で生じる酸塩基反応でオレイン酸がイオン化されることで界面活性を示し、界面張力が場所特異的に変化する ことで生じるマランゴニ流により運動が誘起されていると考え

られる。また、塩基性のアニリン液滴と酸性の塩酸ガスによる系において液滴はガスに引き付けられる方向に運動した(正の走化性)。生物の走化性を模倣するモデル系としてガス刺激を感知して運動する液滴が明らかとなった。更なる研究成果として、水面に浮かべられたアニリンの液滴が自発的な拍動を示す現象を見出し、理論的な解析も行った。単一のアニリン液滴が拍動することだけでなく、

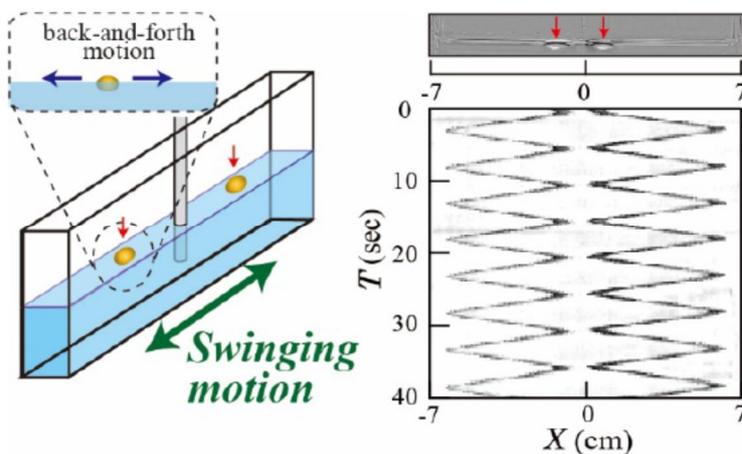


図2 ニトロベンゼン液滴の自発的同調運動 (ACS Omega 2019)

複数の液滴が同期して拍動すること発見 (Langmuir, 2017)。心筋細胞などの生物に見られる動的な同調現象と類似した現象であることから、生命体での自律的な振動現象の本質を追究する上でも、興味ある実験結果となっている。運動の同調のメカニズムについても物理的なモデルを援用した議論を行っている。さらには、化学ポテンシャルによって引き起こされる液滴の自律運動の実験系を発展させ、二つの液滴の運動の相互作用を調べた。その結果、二つの液滴は運動モードが同調した安定な自律運動を行うことを明らかにしている (ACS Omega, 2019)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Danno Keisuke, Nakamura Takuto, Okoso Natsumi, Nakamura Naohiko, Iguchi Kohta, Iwadate Yoshiaki, Kenmotsu Takahiro, Ikegawa Masaya, Uemoto Shinji, Yoshikawa Kenichi	4. 巻 8
2. 論文標題 Cracking pattern of tissue slices induced by external extension provides useful diagnostic information	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 12167/1~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-018-30662-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Nakatani Naoki, Sakuta Hiroki, Hayashi Masahito, Tanaka Shunsuke, Takiguchi Kingo, Tsumoto Kanta, Yoshikawa Kenichi	4. 巻 19
2. 論文標題 Specific Spatial Localization of Actin and DNA in a Water/Water Microdroplet: Self-Emergence of a Cell-Like Structure	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ChemBioChem	6. 最初と最後の頁 1370~1374
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/cbic.201800066	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Harada Yugo, Koyoshi Keisuke, Sakuta Hiroki, Sadakane Koichiro, Kenmotsu Takahiro, Yoshikawa Kenichi	4. 巻 122
2. 論文標題 Emergence of Pendular and Rotary Motions of a Centimeter-Sized Metallic Sheet under Stationary Photoirradiation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 2747~2752
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.7b11123	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Takatori Satoshi, Baba Hikari, Ichino Takatoshi, Shew Chwen-Yang, Yoshikawa Kenichi	4. 巻 8
2. 論文標題 Cooperative standing-horizontal-standing reentrant transition for numerous solid particles under external vibration	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 437~448
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-017-18728-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Sakuta Hiroki, Seo Shunsuke, Kimura Shuto, Hoerning Marcel, Sadakane Koichiro, Kenmotsu Takahiro, Tanaka Motomu, Yoshikawa Kenichi	4. 巻 9
2. 論文標題 Optical Fluid Pump: Generation of Directional Flow via Microphase Segregation/Homogenization	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 5792 ~ 5796
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcllett.8b01876	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Chen Yong-Jun, Sadakane Koichiro, Sakuta Hiroki, Yao Chenggui, Yoshikawa Kenichi	4. 巻 33
2. 論文標題 Spontaneous Oscillations and Synchronization of Active Droplets on a Water Surface via Marangoni Convection	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Langmuir	6. 最初と最後の頁 12362 ~ 12368
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.langmuir.7b03061	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Sakuta Hiroki, Magome Nobuyuki, Yoshikawa Kenichi	4. 巻 26
2. 論文標題 ナノの世界からマクロの世界を動かす:見えない分子から巨視的な動きへ	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 CSJ Current Review	6. 最初と最後の頁 28-36
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tomo Kurimura, Seori Mori, Masako Miki and Kenichi Yoshikawa,	4. 巻 145
2. 論文標題 Rotary motion of a micro-solid particle under a stationary difference of electric potential	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 The Journal of Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 034902(1-4)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4958657	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 5件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 吉川研一
2. 発表標題 Constructing Stable 3D Cell-Assembly without any Artificial Scaffold
3. 学会等名 Kick-Off Symposium: Center for Integrative Medicine and Physics (iCeMS-CiMPhy) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉川研一
2. 発表標題 How does liquid-crystalline ordering create biological functions?
3. 学会等名 27th International Liquid Crystal Conference (ILCC2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉川研一
2. 発表標題 生物ができるのにヒトにはできないこと：生命に学ぶ未踏技術
3. 学会等名 The Cutting Edge (けいはんなリサーチコンプレックス) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉川研一
2. 発表標題 Emergence of Cell-Like Structure & Function under Crowding Condition
3. 学会等名 The International Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 吉川 研一
2. 発表標題 生命・医学と物理の架け橋：DNAから形態形成まで
3. 学会等名 京都府立医大特別講演（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 森 世織
2. 発表標題 直流駆動型無接点回転モータ
3. 学会等名 第77回 応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 作田 浩輝
2. 発表標題 混雑するマイクロ環境下で働くゲノムDNA
3. 学会等名 第67回コロイドおよび界面化学討論会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 小吉 圭祐
2. 発表標題 Pendulum with cm-sized solid substrate Driven by laser
3. 学会等名 日本物理学会2016年秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 木村宗斗
2. 発表標題 Evaluation of the Springs Phenomenon with Instability near Criticality
3. 学会等名 第77回 応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 妹尾駿佑
2. 発表標題 溶液中マイクロスケール粒子のレーザー光による輸送
3. 学会等名 第77回 応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 原田優吾
2. 発表標題 油滴と金属複合体の定常レーザによる自律運動
3. 学会等名 第77回 応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 佐藤 志帆
2. 発表標題 油滴の水面上的での自発運動：往復直線運動と回転運動のモード分岐
3. 学会等名 第67回コロイドおよび界面化学討論会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 吉川 研一
2. 発表標題 生物に学び生物を越える：新しいマイクロ科学の開拓
3. 学会等名 KICK (けいはんなオープンイノベーションセンター) 交流会
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

同志社大学生命物理科学研究室ホームページ http://dmpl.doshisha.ac.jp/

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考