

平成 30 年 6 月 5 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17717

研究課題名(和文)自発的に「泳ぐ」液滴：パターン形成による運動機能獲得

研究課題名(英文)Swimming droplet driven by pattern formation on the interface

研究代表者

江端 宏之 (Ebata, Hiroyuki)

九州大学・先導物質化学研究所・学術研究員

研究者番号：90723213

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)：多くの生物は体の形状を変形させることで自発的な運動をすることが出来る。しかし、生物・無生物に関わらず、変形に誘起された自発運動が持つ普遍的な性質は明らかになっていない。系統的に変形と運動の関係を調べるため、本研究では表面波に駆動されて高粘性流体中を泳ぐ液滴に対し、形状と運動の関係を網羅的に調べた。その結果、併進運動や自転運動などの運動は液滴上の定在波の形状の対称性の破れにより起こることが分かった。また、自己駆動粒子のモデル方程式を使うことで、泳ぐ液滴のダイナミクスだけでなく細胞運動を定量的に再現することが出来ることを示し、変形駆動の自発運動を統一的に記述できる可能性があることを示した。

研究成果の概要(英文)：In general, many organisms spontaneously migrate by self-propelling motions through the repeated deformation of their body. Although such self-propelling motion is ubiquitous for both living and non-living objects, it is still unclear whether universal relations between shape and movement exist. To explore universal laws of self-propelled objects, I investigated bifurcations of motion of a swimming droplet in viscous fluid. Through the 3D measurement of shape of the droplet, I showed that spontaneous symmetry breaking of the standing wave on the droplet induces the bifurcation of the droplet motion. We demonstrated that not only migration modes of swimming droplet but also cell migration dynamics can be well described by the model equations of deformable self-propelled particle. This result suggests the possibility to treat the self-propelled motions of both living and non-living objects in the same theoretical framework.

研究分野：アクティブマター物理学

キーワード：アクティブマター 自発運動 細胞運動

1. 研究開始当初の背景

外界からのエネルギー流入と内部でのエネルギー散逸が絶えず起こる非平衡散逸系では従来の熱平衡系では見られない特異的な時空間構造が自発的に発生することが知られている。非平衡散逸系の大きな特徴であるパターン形成は化学反応系や流体系など多くの分野で古くから研究されてきた。近年、自己組織化によるパターン形成が、生物の動的機能を理解する上で着目されるようになってきている [1]。一方で、液滴などの無生物の粒子が、粒子表面でのパターン形成によって生物と同様の機能を獲得できるかというボトムアップ的問題も重要である。

多くの生物で見られる動的機能の一つとして、体の形状を変形させることで動く、這う・泳ぐ・歩くなどの自発的運動がある。しかし、これらの運動を調べる上で、生物の実験系では再現性の低さやパラメーター制御の困難さが問題となっている。私は再現性が高くパラメーターの制御も容易な無生物系の実験に着目し、粒子表面でのパターン形成と、粒子の変形による自発運動を結びつけることを考えた。

2. 研究の目的

細胞運動に代表されるように、多くの生物は変形をしながら自発的に動き回ることが出来る。生物・無生物に関わらず外からの刺激を必要としない自発的運動をするためには、非対称な形状など、空間的な対称性の破れが不可欠である。しかし、変形に駆動された自発運動を普遍的・統一的に記述できるかは分かっていない。私は生物・無生物に関わらず、自発運動する粒子の形状と運動の間にある普遍的な関係を実験的に明らかにすることを研究の目的としている。

3. 研究の方法

私はこれまでの研究において、水よりも重く粘性の高いシリコンオイル上に水滴を乗せ垂直加振すると、液滴が自発的に「泳ぐ」現象を発見している [2]。加振により水滴上に局在した定在波(ファラデー波)が起こり、液滴表面に波が立つことで高粘性流体中を液滴が「泳いで」移動していると考えられる。さらに、加振周波数を変えていくことで、液滴の形状の対称性が次々と破れてゆき、自転運動・公転運動・直線運動・ジグザグ運動と運動のモードがカスケード的に分岐していくことを発見した[図1 (a), (b)]。分岐点近傍では系の詳細によらない普遍的な性質が現れるため、運動の分岐点近傍での振る舞いを詳細に調べることで、パターン形成に伴う自発的運動に関する物理学的な知見を深めることが出来ると期待される。そこで、この「泳ぐ」液滴について実験と理論の両面から研究を行う。これまでの研究により、液滴の運動が分岐する際に定在波の形状と液滴周りの流れ場の対称性が破れることが分かっ

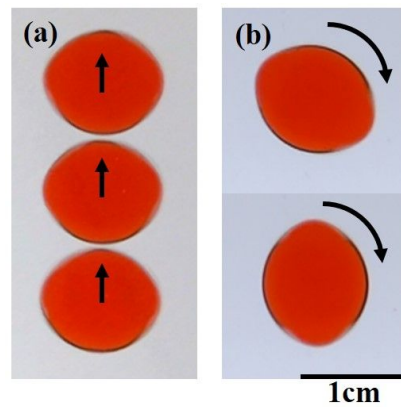


図1 ファラデー波により泳ぐ液滴 (a)並進運動する液滴 (b)自転運動する液滴

てきている。また、液滴の変形と運動の原因となっているのは液滴上の定在波であると考えられる [2]。そこで様々な運動の分岐点近傍において、レーザー変位計による定在波の3次元形状の測定と、レーザーシートを使った粒子追跡法による流れ場の測定を行う。これにより液滴の運動のメカニズムを解明することを目指す。実験から得られた知見と、流体力学的な解析手法を使い液滴の変形と重心運動のモデル方程式を導出することを目指す。そして、泳ぐ液滴で得られた知見を基に、生物・無生物系における様々な自己駆動粒子を解析することで、粒子の形状と運動の間にある普遍的な関係を検証する。

4. 研究成果

(1) まず、泳ぐ液滴の静止状態から並進運動への分岐について調べた。これまでの実験により液滴上のファラデー波の並進対称性が自発的に破れることで液滴の並進運動が起こることが示唆されていた。私はファラデー波の空間的な並進対称性がどのように破れるかについて調べるため、直方体容器中でのファラデー波について調べた。液滴と同程度の大きさの直方体容器に絵の具で白濁させた水を満たしたものを垂直加振し、固定境界条件でのファラデー波を起こした。このときのファラデー波の形状をレーザー変位計でスキャンすることで調べた。その結果、加振周波数を徐々に下げると、液滴上のファラデー波と同様に、ある臨界周波数以下でファラデー波の前後対称性が自発的に破れることがわかった。高周波数では波の腹の位置が直線的に並んでいるが、低周波数になると腹の位置が弓なりにたわむ[図2(a), (b)]。この対称性の破れについて定量的に調べるため、定在波の振幅の空間分布について、2次元フーリエモード解析を行った。並進対称性の破れに寄与するフーリエモードのうち最も振幅の大きい波数の周波数依存性を調べた結果、臨界周波数以下で振幅が連続的に立ち上がることを見出した[図2(c)]。十分に広い容器中では加振周波数が小さくなると共にファラデー波の波長が長くなることが知られている [3]。一方、液滴や狭い容器な

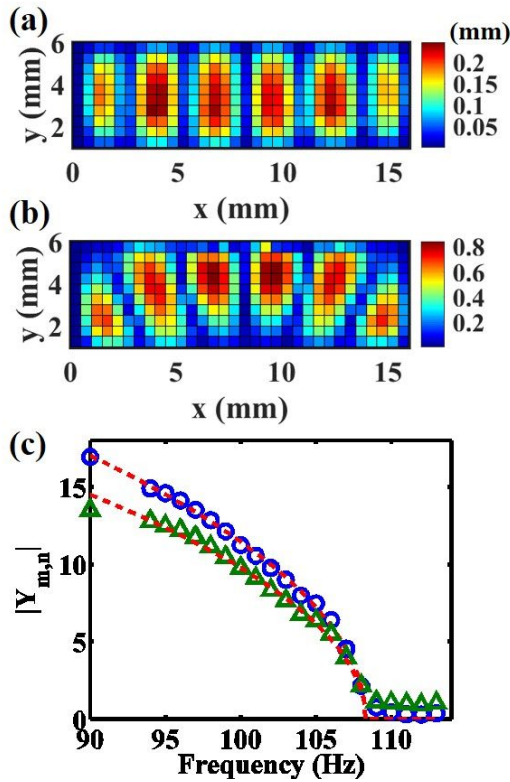


図2 長方形容器中のファラデー波の振幅
 (a)高周波数でのファラデー波の振幅。周波数 $f=110\text{Hz}$ (b) 低周波数でのファラデー波の振幅。 $f=90\text{Hz}$ (c) ファラデー波のフーリエモード $Y_{m,n}$ のうち並進対称性の破れに寄与する波数の振幅の周波数依存性。緑： $Y_{1,1}$ 青： $Y_{5,1}$

どの狭い空間では、周波数に対し波長が連続的に大きくなることが出来ない。そのため、波がたわむことで波長を大きくしていると考えられる。このことからファラデー波の並進対称性の破れは、ファラデー波が狭い空間に閉じ込められていることにより起こっていると考えられる。

また、液滴上のファラデー波について並進運動の分岐点前後でファラデー波の並進対称性がどのように破れているかについても定量的に調べた。ここでは、画像からファラデー波の腹の位置を推定し、腹の位置をつなぐ曲線の曲率の周波数依存性を調べた[図3(a),(b)]。その結果、液滴の並進運動の分岐点において曲率が0から有限の値を持つようになることを示した[図3(c)]。また、液滴を容器底面に貼り付け、並進運動をすることが出来ない場合でも、ファラデー波の前後対称性は低周波になると破れることが分かっている。これらの実験結果は、液滴においても固定境界の場合と同様にファラデー波の自発的対称性の破れが起こり、その結果として並進運動が現れることを示している[図書1]。

(2) 次に私は液滴の静止状態から自転運動への分岐について調べた。液滴上のファラデー波の腹の数と液滴の運動の関係を加振強

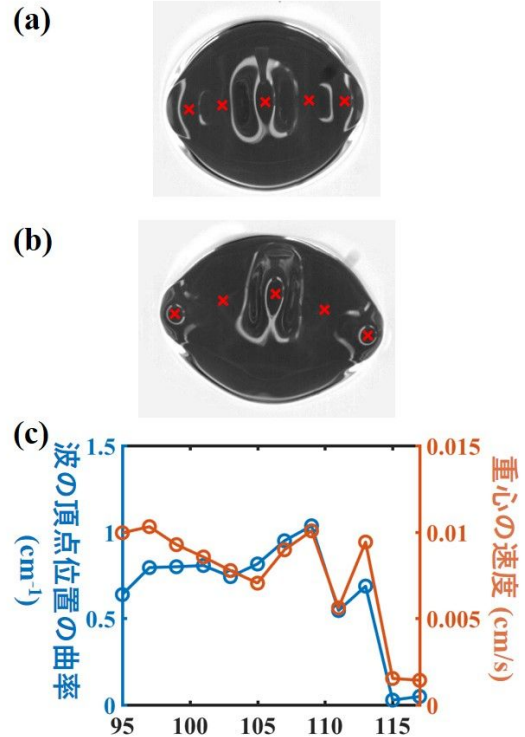
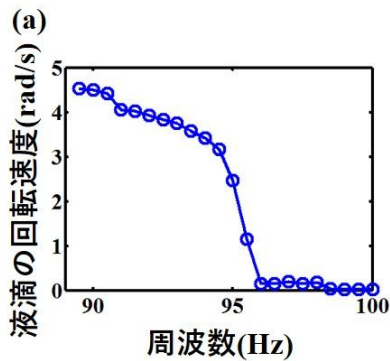


図3 液滴上のファラデー波の並進対称性と並進運動。(a,b) x が波の腹の位置を表す。(a)静止した液滴。 $f=111\text{Hz}$ (b) 並進運動する液滴。 $f=91\text{Hz}$ (c) ファラデー波の対称性の破れの強さ(青)と並進運動の速度(赤)の周波数依存性。

度・振動数を変えながら調べた結果、腹の数が2の場合のみ加振周波数の低下と共に静止状態から自転へと分岐が起こることがわかった。そこで、腹の数が2の場合について液滴の回転の角速度の加振周波数依存性を調べた。その結果、ある臨界周波数以下で回転の角速度が立ち上がることを見出した[図4(a)]。液滴の画像からファラデー波の腹の位置を推定した結果、自転する液滴では液滴形状の長軸とファラデー波の腹の位置を結ぶ直線が一致せず、有限の角度で交わることが分かった[図4(b)]。このことから、ファラデー波の位置が液滴形状の対称軸からずれることで回転対象性が破れ、自転していると考えられる。

自発運動する粒子のモデルでは、自転のメカニズムとして粒子周りの渦によるものと、粒子表面の変形が一方に伝播することで自転しているように見える場合の2つが予測されている [4, 5]。そこで、自転する液滴の液滴内外の流れ場を測定し、液滴周りの渦と自転の関係についてトレーサー粒子の追跡により調べた。その結果、液滴内外の渦は液滴の自転方向と逆向きになっており、流れの速度は液滴の自転速度よりも充分に遅いことが分かった。したがって、自転する液滴では液滴表面の変形が進行波として伝播することで自転していると考えられる。

(3) 私のこれまでの研究により液滴が浮か



(b) 波の腹を結んだ線
楕円の長軸

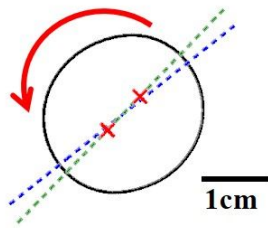
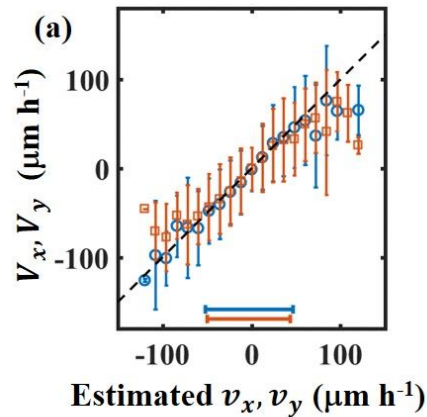


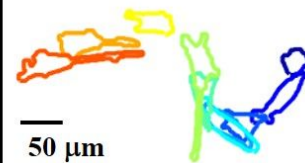
図4 自転運動する液滴。(a) 自転の回転速度の加振周波数依存性。(b) 自転する液滴の回転対称性の破れ。

ぶシリコンオイルの粘性が低い場合、往復運動や振動的直線運動、多角形運動などの複雑な運動が現れることが分かっている。しかし、ファラデー波の形状の時空間的な変化と運動の関係はわかっていなかった。そこで、私は複雑な液滴運動についてファラデー波の形状と運動の関係を加振強度と周波数を変えながら調べた。その結果、静止状態から往復運動、振動的直線運動への運動モード分岐が起こることを発見した。また、これらの複雑な運動はファラデー波の腹の数と並進対称性の破れが時間的に変化することで起こることが分かった。例えば、静止状態から振動的直線運動への分岐点周りにおいて、静止した液滴上には軸対称な波が立っている。一方、振動的直線運動へと分岐すると並進対称性の破れた腹の数が3の波が現れ直進運動を開始する。しかし、腹の数が3の波は時間的に安定ではなく、時間と共に中心の腹が液滴の中心部へと移動してゆき、左右の腹が消え、軸対称な波となる。この時、液滴は並進運動をやめ静止する。この軸対称な波も安定ではなく、時間と共に液滴の中心位置からずれ腹の数が3の波が現れ、液滴は再度並進運動を開始する。このような波の腹の数の変化が周期的に起こることで振動的直線運動が現れる。液滴の軌跡が多角形状となる多角形運動についても波の腹の数の時間的な変化と共に現れることが分かった。

このように、表面波の時間・空間的な対称性の破れが運動の分岐と深く関わっていることがわかった。その結果、様々な運動に対し分岐点近傍において空間的な対称性の破れと自発運動の関係を、体系的かつ網羅的に



(b) Experiment



(c) Model

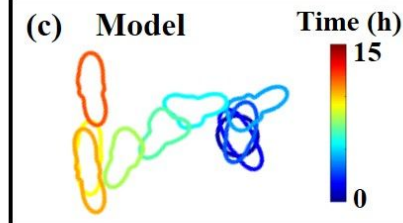


図5 線維芽細胞の細胞運動のモデル。(a) アメーバ様運動の方程式からの速度の推定値 v_x, v_y と速度の実測値 V_x, V_y の関係。黒の破線が $V_i = v_i$ を示す。(b) 線維芽細胞の形状と位置の時間変化。(c) 細胞運動のモデルの数値計算結果。

明らかにすることが出来た。

(4) 私はさらに生物・無生物系に関わらず変形に誘起された自発運動の持つ普遍的な性質を調べるために、ゲル上の線維芽細胞の形状と運動について、形状のフーリエモード解析を中心に詳細な解析を行った。その結果、線維芽細胞の形状と運動の間にある関係式が、流体中を伸び縮みによってアメーバ遊泳する粒子の運動の方程式 [6] と等価になることが分かった [図 5(a)]。これは伸び縮みによる自発運動が生物・無生物に関わらず系の詳細によらない普遍性を持つことを示唆している。また、私はアメーバ遊泳による運動の方程式と変形する自己駆動粒子のモデル方程式を組み合わせることで、線維芽細胞の形状と運動の統計的な性質をほぼ全て定量的に説明することが出来ることを示した [図 5(b), (c)]。これは変形する自己駆動粒子のモデル方程式を使うことで、泳ぐ液滴のダイナミクスだけでなく細胞運動を定量的に再現することが出来ることを示している [雑誌論文 1]。このように細胞の形状の統計的な性質

を含め、細胞運動を定量的に説明できるモデルは他に類が無い。自己駆動粒子のモデルに基づき、細胞の形状や運動の性質の定量的評価を行うことで、画像解析から細胞の分類などの画像診断を行うことが出来ると期待される[7]。

私はさらに無生物系における孤立パターンのダイナミクスに対しても自己駆動粒子の観点から形の変化と運動の間にある関係を調べている。垂直加振下における濃厚懸濁液の孤立構造(heaping)の形成と運動について、流体力学に基づきモデル化を行った。その結果、孤立構造が現れる臨界加振強度や孤立構造の並進運動などの実験結果を説明することが出来た[雑誌論文 2]。また、これまでの研究により、自己複製する孤立パターンの分岐点近くでのダイナミクスが、自己駆動粒子のモデルにより説明できることも分かっている[8]。以上の結果は変形する自己駆動粒子のモデルが無生物・生物を問わず一般的に適用できる可能性を示している。

<引用文献>

Eric Karsenti, Nat. Rev. Mol. Cell Biol. 9, 255-262 (2009).

H. Ebata and M. Sano, Sci. Rep. 5, 8546 (2015).

K. Kumar and L. S. Tuckerman, J. Fluid Mech. 279, 49 - 68 (1994).

M. Tarama and T. Ohta, J. Phys.: Condens. Matter 24, 464129 (2012).

M. Tarama and T. Ohta, Phys. Rev. E 87, 062912 (2013).

A. Farutin, S. Rafai, D. K. Dysthe, A. Duperray, P. Peyla, and C. Misbah, Phys. Rev. Lett. 111, 228102 (2013).

F. Buggenthin et al., Nat. Method 4, 403 (2017).

H. Ebata and M. Sano, Phys. Rev. E 88, 053007 (2013).

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 2件)

Hiroyuki Ebata, Aki Yamamoto, Yukie Tsuji, Saori Sasaki, Kousuke Moriyama, Thasaneeya Kuboki, and Satoru Kidoaki, Persistent random deformation model of cells crawling on a gel surface. Scientific Reports 8, 5135 (2018). DOI:10.1038/s41598-018-23540-x, 査読有り

Hiroyuki Ebata and Masaki Sano, Model of heap formation in vibrated gravitational suspensions. Physical Review E 92, 053016 (2015). DOI: 10.1103/PhysRevE.92.053016, 査読有り

[学会発表](計 11件)

Hiroyuki Ebata, Aki Yamamoto, and Satoru Kidoaki, Migration model based on persistent fluctuation of cell shape.

International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2017, Sendai International Center, 2017/11/20.

稲垣紫緒, 江端宏之, つぶつぶの物理. 福工大土曜談話会, 福岡工業大学, 2017年10月28日.

江端宏之, 山本安希, 木戸秋悟, 形態の持続的揺らぎに基づく細胞運動モデル. 日本物理学会2017年秋季大会, 岩手大学, 2017年9月22日.

江端宏之, 山本安希, 木戸秋悟, Dynamics of cells crawling on gel surface. アクティブマター研究会 2017, 九州大学, 2017年1月20日.

江端宏之, 稲垣紫緒, 振動的機械刺激に誘起される粉粒体のパターンダイナミクス. 計算粉体力学研究会, 同志社大学, 2016年12月6日.

江端宏之, 佐野雅己, 表面波を使い自発的に泳ぐ液滴. 第67回コロイドおよび界面化学討論会, 北海道教育大学旭川校, 2016年9月22日.

江端宏之, 佐野雅己, “泳ぐ”液滴の形状の対称性と運動モード. アクティブマター研究会 2016, 九州大学, 2016年1月22日.

江端宏之, 稲垣紫緒, Self-replicating band of granular segregation. ゆらぎと構造の協奏 第3回領域研究会, 九州大学, 2016年6月18日.

江端宏之, 稲垣紫緒, 水平振とうによる粉粒体の自己複製パターン. 西日本非線形研究会 2016, 九州大学, 2016年6月25日.

江端宏之, 稲垣紫緒, 粉粒体の偏析による自己複製パターン. 第121回日本物理学会九州支部例会, 九州工業大学, 2015年12月5日.

江端宏之, 稲垣紫緒, 水平振とうによる粉粒体の相分離現象. 日本物理学会 2015年秋季大会(2015年9月16-19日), 関西大学, 2015年9月17日.

[図書](計 1件)

江端宏之, 材料表面の親水・親油の評価と制御設定 第5章第9節 表面波に駆動された液滴, テクノシステム, P297 - 310 (2016).

6 . 研究組織

(1)研究代表者

江端 宏之 (EBATA, Hiroyuki)

九州大学・先端物質化学研究所・学術研究員

研究者番号: 90723213