

令和 2 年 4 月 21 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05605

研究課題名（和文）アクティブソフトマテリアルの運動モード、相互作用、そして流体記述の構築

研究課題名（英文）Motion, interaction, and hydrodynamic description of active soft materials

研究代表者

義永 那津人 (Yoshinaga, Natsuhiko)

東北大学・材料科学高等研究所・准教授

研究者番号：90548835

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000 円

研究成果の概要（和文）：アクティブソフトマテリアルは、自発的に運動する粒子の運動メカニズムや集団運動について研究する分野である。内部に持ったエネルギーを周囲の環境に散逸し、非平衡状態を保ちながら協同的な振る舞いを示す。細胞運動は典型的な例である。アクティブマターのモデルはいくつか提案されているが、流体相互作用が関わる場合、粒子間の相互作用を計算し、集団運動を解析することは困難であった。本研究では、自己駆動粒子間の実効的相互作用を計算し、アクティブマターの集団の流体的な振る舞いを明らかにした。また、細胞運動のモデルを解析して、アクティブストレスの分布の不均一性と自己駆動との関係を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

アクティブマターは、平衡状態のような自由エネルギーが一般的には存在しないため、その集団の振る舞いを直感的に予想することは困難である。本研究では、実効的な相互作用を計算することで、配向相互作用の有無を解析することができる。また、双極子的なアクティブストレスの不均一性から生じる四重極子的な力の場によって自己駆動が起きることから、どのような分布が自己駆動に重要な役割を果たすのかを明らかにした。最近では、自己駆動粒子を化学反応を用いて実現することが可能になってきており、目的の場所に粒子を輸送するなどのスマート材料の基礎付けとして意義があると考えている。

研究成果の概要（英文）：Active soft materials are the field studying the mechanism of self-propelled particles and their collective behaviours. They demonstrate cooperative behaviours in non-equilibrium states through dissipation of internal energy to their environment. Cell motility is a typical example. Although several models have been proposed, analyses on interactions between particles and collective behaviours are difficult in the presence of the hydrodynamic interaction. We computed the effective interaction between self-propelled particles and clarified hydrodynamic modes of active matters. We have also studied the model of cell motility and showed that inhomogeneity of the active stress gives rises to spontaneous motion.

研究分野：アクティブソフトマテリアル

キーワード：アクティブマター ソフトマター 生物物理 流体力学 非線形ダイナミクス 非平衡物理 細胞運動 相転移

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。

1. 研究開始当初の背景

自発的に運動・変形する集団は、動物や人間の群れから細胞集団、生体分子の動的な自己組織化構造まで幅広い時間、空間スケールで見られる。これらの現象に共通するのは、個々の要素がエネルギーを獲得し、消費することによって非平衡状態で動的な協同性を実現していることである。このような系はアクティブマター、あるいはアクティブソフトマテリアルと呼ばれ最近盛んに研究が行われている。平衡状態の近傍では、要素間の相互作用を様々な階層でモデル化し、自由エネルギーを記述することにより、例えば引力であれば相分離構造が現れるなどの定性的な評価が可能である。しかしながら、非平衡状態では自由エネルギーに相当する変分関数が必ずしも存在しないため、どのような相互作用を与えれば、大きなスケールでどのような集団運動が得られるのかを一般的な原理によって評価することが困難である。そこで、現状では比較的単純なモデルを用いて集団運動のクラス分けや分類に向けた研究が行われている。

Active Brownian Particle (ABP)は、最も単純な自己駆動粒子のモデルで、Brown 運動する個々の粒子が方向を持ち、その方向に一定の力を受け続けることによって自発運動しながら相互作用する。このモデルでは、斥力のみによって相分離状態が現れる MIPS (Motility-Induced Phase Separation) という現象が知られている (図 1B)。これは、高密度になると斥力相互作用によって運動速度が低下し、交通渋滞のようにさらに粒子が集まってくることに起因する。また、Vicsek モデルと呼ばれる局所的な配向相互作用する自己駆動粒子の集団では、平衡状態では起きえない有限温度での長距離配向秩序が実現することも知られている (図 1A)。

これらのモデルでは、個々の粒子の自発運動の起源などは考えず、相互作用も現象論的に記述した物であるが、一方で、squirmers や自己泳動粒子と呼ばれるモデルなどでは、流体力学を適切に考慮することによって、粒子表面の自己推進力を用いた運動、そして相互作用の記述が力学的に整合性をもった形で表現できる。ABP や Vicsek モデルと比べてこれらのモデルは、流体力学的相互作用を適切に取り扱うことが困難であるため、解析的な取り扱いはおろか、数値シミュレーションを行うのも非常に困難であった。

一方、我々は化学反応によって駆動される液滴について解析を進めてきており、自発運動と変形に対する縮約された方程式の導出を行ってきている。この液滴では、化学物質を等方的に放出、または消費することによって非平衡状態を保っている。上述のモデルとは異なり、化学反応は等方的に起きるため、このモデルでは非線形効果による自発的対称性の破れによって自発運動が実現する。化学反応によって駆動される液滴間には、液滴の内外に作られる濃度場と流体の流れによって相互作用が生じる。我々はこれらの相互作用について解析的な表現を得ており、数値計算の結果と比較してよい一致が得られている。しかし、液滴の変形を含めた相互作用の一般的な形式や集団運動がどうなるのか、例えば、ABP や Vicsek モデルで見られる相分離や一様配向状態は起きるのかは不明であった。また、化学反応による液滴の運動は、最近実験的に構築されているものの、細胞運動とはその自発運動のメカニズムが大きく異なる。そこで、これまで得られた知見をより発展させるためのモデルを考察する必要があった。

2. 研究の目的

アクティブソフトマテリアルを記述する粒子・液滴レベルの微視的なモデルがいくつか提案され解析が進められている一方で、アクティブゲルの理論と呼ばれる、液晶の流体記述を非平衡状態に拡張した理論についても理解が進んでいる。しかし、流体描像の中に現れる係数は完全に現象論的であり、自己駆動粒子がどのように運動するか、そして、他の粒子とどのように相互作用するか、との関係は未開拓である。本研究では、自発的に運動し変形する部分のみに注目して単純化、あるいは縮約したモデルを解析することによって、集団運動の流体的な記述に現れる係数の物理的、微視的な意味を明らかにしていく。

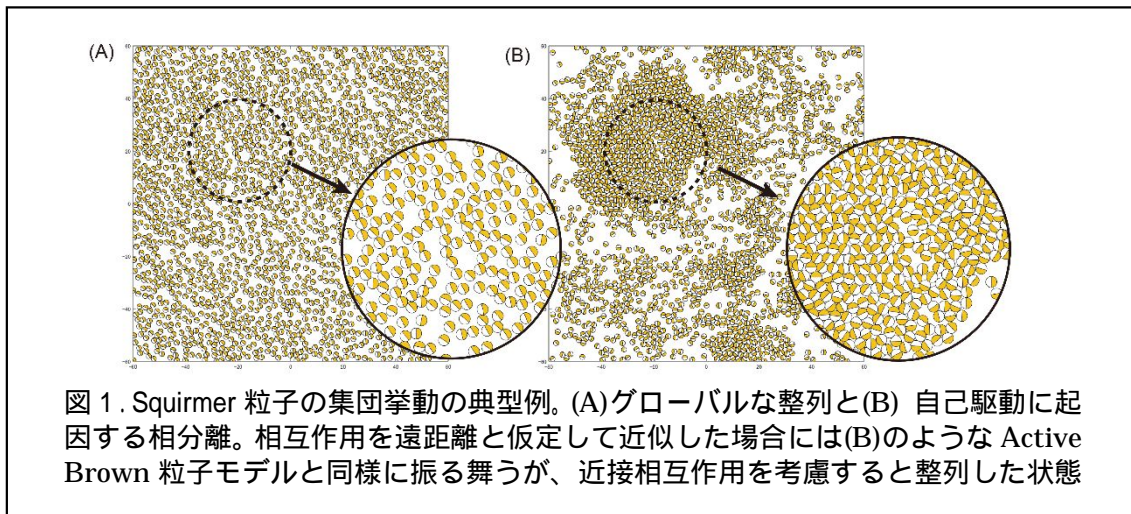


図 1. Squirmer 粒子の集団挙動の典型例。(A) グローバルな整列と (B) 自己駆動に起因する相分離。相互作用を遠距離と仮定して近似した場合には (B) のような Active Brown 粒子モデルと同様に振る舞うが、近接相互作用を考慮すると整列した状態

3. 研究の方法

本研究では三方向からアクティブマテリアルの研究を行った。まず、自発運動する粒子のモデルを用いて、他の粒子との相互作用を含めた近似的な運動方程式を構築し、集団運動を解析する(1)。ここで重要になるのは、相互作用が一般的には相互作用ポテンシャルなどの形で書けず、流体相互作用などを近似して表現する必要があることである。流体力学的相互作用が顕著に表れる squirmer 粒子や自己泳動粒子を主な対象として研究を行った。次に、自発的に運動する粒子の集団、例えばアクトミオシンからなる細胞骨格、が内包された系の自発運動の解析を行った(2)。この場合、内部の自由度は連続体として表現されるが、細胞を模した液滴は、変形しながら運動する粒子のように振る舞う。この運動がどのように表現されるのかを明らかにする。最後に、当初予定していなかった、実験グループとの共同研究についても結果を記載する(3)。

(1) squirmer 粒子、自己泳動粒子の基礎モデルと流体記述

squirmer などの自己駆動粒子間の相互作用は流体を介して現れるため、相互作用の形は一般的には複雑で、ポテンシャルの形で書くことはできない。しかしながら、我々は、squirmer や自己泳動粒子に対して、相互作用を長距離相互作用と近距離相互作用に分けて、近似的な表現を解析的に計算した。その結果、ABP の拡張のような形で流体力学的相互作用を考慮した自己駆動粒子の運動の記述を得ることができる。この近似的な相互作用を用いたシミュレーションを行い、流体を陽に取り入れたシミュレーションとの比較を行った。

我々は流体相互作用の近似的な形を導出しているために、集団運動に結びついている相互作用のみを抽出して単純化したモデルを解析することができる。流体相互作用の中には、粒子間に平行な力、垂直な力、そして回転を駆動するトルクが長距離部分と近距離部分にそれぞれ存在するが、それらの中でも近距離の回転相互作用のみを用いて集団運動を解析する。この単純化モデルでも、長距離配向秩序を実現することができ、さらに、回転ノイズを加えて動的な相転移を見ると、転移点近傍に、配向状態とランダムな状態の共存状態が実現することが現在まで明らかになっている。注意すべき点として、この単純化モデルの振る舞いは Vicsek モデルと類似しているが、実は相互作用は居所的な配向になっていない。その意味で、この単純化モデルは Vicsek モデルとは別の普遍クラスに属していると考えている。得られたモデルを用いて、微視的なレベルでの違いがどのように流体描像の係数に表れるのかについて解析を行った。

(2) Active Nematic Drop の自発運動と変形の特徴付け

細胞運動のような複雑な自発運動の基礎的な理解に向けて、アクティブ液晶液滴の理論的研究も行った。この系は、アクティブストレスと呼ばれる、平衡系では存在しない項を含んだアクティブ液晶を閉じ込めた液滴が、自発的に変形し運動するものである。アクティブストレスは細胞骨格と分子モーターが生み出す力学的ストレスに対応している。そこで、非平衡な液晶場を内包した Active Nematic Drop と呼ばれるモデルの自発運動を解析した。このモデルでは、液晶場を内包した液滴がアクティブストレスと呼ばれる効果によって流体運動をとそれに伴う自発的な運動や変形を誘起する。また、液滴の変形によって液晶場の境界が時間変化するため数値計算が困難である。そこで、phase-field 法によって、液滴の場を導入し、液晶場と流体場を結合させることによって数値計算を可能にする。そして、液滴の界面がシャープな極限において、液晶場がどのような流れ場を駆動するのかを解析的に計算した。さらに、流体場が液晶場にフィードバックを与えることによって静止状態が不安定化し自発運動が実現することを解析し、その転移点を計算した。さらに、数値計算によってアクティブストレスを大きくした時にどのような自発運動が現れるのかを相図として計算した。アクティブストレスが大きい時の液晶場と流れ場を解析し、液晶場の欠陥の密度と自発運動との相関を解析した。

4. 研究成果

まず、本研究課題を通じて、研究会等での講演のみならず、総説や解説などによりアクティブマターの面白さや研究の重要性を普及することができた。アクティブブラウン粒子、squimer、自己泳動運動、そしてマランゴニ効果による自発運動についてのモデルについてまとめた総説を Journal of Physical Society Japan 誌に執筆した。また、流体力学の理論に関する手法をまとめた内容を本の一章や分子シミュレーション学会誌に掲載し、また集中講義などによってアクティブマターの研究の現状についてのまとめを行った。これらの過程により、アクティブマターの現状を広い読者に伝えることができたと同時に、アクティブマターの理論の現状を整理することができた。流体力学を伴わないアクティブマターの研究の理論についても総括することができ、流体力学の効果のどのような側面を集中的に研究すべきなのかを同定することができた。流体を伴う自己駆動粒子の集団運動に関しては、現在はシミュレーション結果がいくつかあるだけで、粗視化された流体記述は未だ確立されていない。これまでは、粒子間相互作用から希薄濃度を仮定し、運動方程式から流体記述を直接導出することを考えてきたが、これは相互作用が複雑であることや、興味深い現象が希薄濃度では起きないことからあまり有用でないことが分かってきている。一方、流体記述の立場から流体の長距離相互作用のみを考慮すると、一樣配向状態が実現しないことが分かっているが、これはシミュレーションの結果とは一致しない。そこで、流体の遮蔽効果がどのように起きるのかを粒子と流体のレベルから議論すればいいこと

が分かってくる。

各研究に対する成果については、研究の方法の課題に合わせて議論する。

(1) 自発運動の中でも、周囲の流体の運動を伴う squirmer や自己泳動現象粒子のモデルでは、長距離力であり、多体相互作用であり、さらに、近距離で発散が生じる。そのため、流体中で粒子が運動する懸濁液のダイナミックスの理論的な解析は、数値計算であっても非常に困難である。我々は、流体相互作用の近距離で生じる大きな力に注目し、系統的にこの相互作用を近似的に計算することによって、近距離相互作用が squirmer の集団配向に重要な役割を果たすことを明らかにした。まず、流体相互作用による力を active force と passive force に分解し、粒子にかかる力とトルクがゼロであることを用いて、各粒子の運動速度と回転速度を計算した。これは、従来の遠距離の相互作用のみを考慮したモデルとは異なり、近距離相互作用を適切に取り入れたものである。得られたモデルを用いると、長距離配向秩序や MIPS がパラメーターを変えることによって得られることが明らかにした(図1)。この手法の利点は、相互作用の一部のみを分離して取り出すことが容易な点にある。そこで、近距離の流体相互作用のみを取り入れた簡略化モデルを提案し、排除体積相互作用が重要であることを明らかにした。さらに、二流体モデルを用いて、一様配向状態の実現が、流体の遮蔽効果によって生じることを連続体モデルの立場から議論した。本結果は、Physica Review E 誌の Rapid Communications および European Physical Journal E に掲載済みである。

千葉大学の北畑裕之氏と共同で、化学反応によって生じるマランゴニ効果で自己駆動される樟脳粒子の周りの化学物質の場の拡散係数が、流体の流れ場によって元の拡散係数よりも非常に大きくなることを理論的な計算によって示し、数値計算によってその正当性を確認した。この結果は、これまで実験と理論との定量的な比較において不自然に大きな拡散係数が必要であったことの原因がマランゴニ効果による流れ場であることを示唆している。本結果は Journal of Chemical Physics 誌に掲載されている。

(2) まず、理論モデルの中から自発運動と変形を引き起こすための最低限の効果を抽出した。先行研究では、細胞運動は低レイノルズ領域で起きるため流体場に慣性項は必要ないはずであるが計算の利便性のために入れられているなど、 unnecessary 項が多く含まれて非常に煩雑であった。モデルの次元解析から、自発運動への転移はアクティブストレスと、液晶場の流体への応答の項によって特徴づけられることを明らかにした。さらに、自発運動が生じる物理的な起源を明らかにするために、液滴内部に働く力の分布を多重極展開で表現した。実は液滴の運動に結びつく力場は二つしかなく、一つは外力として液滴にかかる力の総和が有限になることである。細胞運動などの自発運動ではこの効果は存在しない。二つ目は、四重極から生じる流れ場で、この効果が squirmer や自己泳動粒子を含めた多くの自発運動する粒子・液滴の運動の期限になっている。Active stress は双極子的な力場なので、このような効果が生じるのは一見不思議であるが、我々は、双極子が不均一に分布することによって、四重極的な力場が生成され自発運動へとつながることを示すことで、アクティブ液晶液滴が自発的に運動する条件を導出した。この配向場は、一様配向が不安定化した際に最初に生じる配向の摂動である。つまり、配向の摂動が流れ場を生成しそれがさらに配向場を乱す、そしてその配向場は自発運動と結びついたものであるから、ある閾値以上の active stress で自発運動への転移が起きるといえる(図2(A,B))。上記の簡略化したモデルを用いて、液滴の界面がシャープな極限において、液晶場と流体場を解析的に計算することによって、転移点を計算することができた。

また、数値計算によって、active stress を大きくしていくと、静止状態から自発並進運動、回転運動、ジグザグ運動、そしてランダムな運動が生じることを明らかにした。このような詳細な相図は、GPU による計算の高速化を行うことによってはじめて可能になった。このような様々な運動モードは active stress の符号に依存しており、contractile なストレスの時には生じず extensile の時にのみ起きることも分かった。上記の解析的な計算から、この非対称性は、それぞれの符号の無限系での一様配向状態の安定性からくることが分かり、contractile は一様配向が安定であるが液滴に閉じ込めることによって不安定化が起きる一方で、extensile の場合は、無限系でそもそも不安定であることから、液滴内に閉じ込めても運動のような最低時のモードだけではなく次々と大きなモードが不安定化していくということが明らかになった。さらに、active stress が大きい場合の数値計算を行い、欠陥が生じることによって液滴が変形し運動が

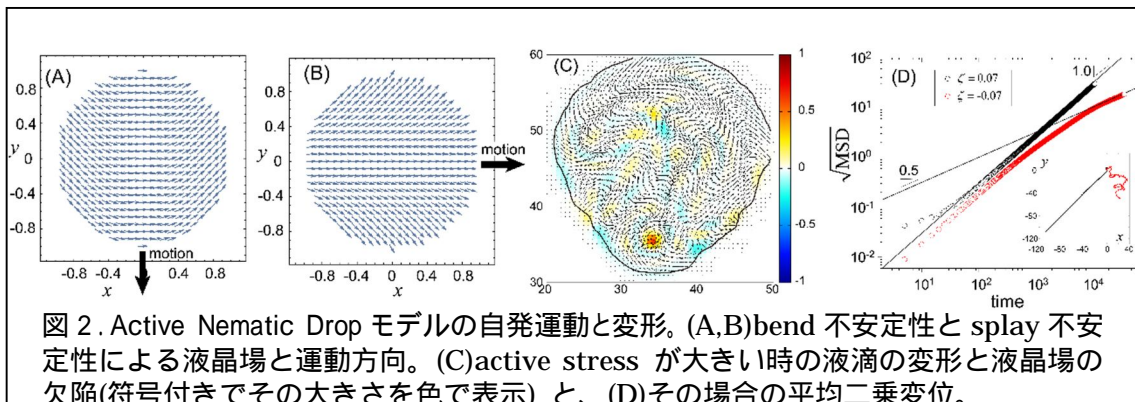


図 2. Active Nematic Drop モデルの自発運動と変形。(A,B) bend 不安定性と splay 不安定性による液晶場と運動方向。(C) active stress が大きい時の液滴の変形と液晶場の欠陥(符号付きでその大きさを色で表示) と、(D) その場合の平均二乗変位。

ランダムになることも示した(図 2(C,D))。本結果は Journal of Chemical Physics 誌に掲載されている。

(4) 本研究課題を推進して講演やセミナー等を行う中で、実験グループとの共同研究が派生した。特に生体分子を用いた実験との連携では、これまでの研究結果や手法を生かして、実験結果を理解するためのモデルを構築し比較を行った。このような研究は当初予定していたものではなかったが、本研究の最終目標は生物のような非常に複雑なシステムを物理的に理解することだったので、現実の実験結果との比較を行うことができたことは大きな収穫であった。以下のその成果を記載する。

平面基盤にキネシンなどの分子モーターを配置し、その上に微小管と呼ばれるフィラメント状のたんぱく質を置いてそれらの運動を観察する手法が微小管を分子モーターで駆動した motility assay と呼ばれ幅広く研究されている。テキサス大学の Teizer 教授のグループの Kim 研究員によって行われた実験で、微小管が並進運動し、一様配向状態を実現しながら大域的に回転することが見いだされた。そこで、この実験結果を理解するために、図 3(A)によって表される自発運動するフィラメントのモデルを構築し、シミュレーションによって解析を行った。フィラメントが自発的な曲率を持つことによって、自発運動からフィラメントの回転運動が生じ、また、フィラメント間の配向相互作用から大域的な配向状態が実現することが分かった(図 3(B,E))。フィラメント状の分子の相互作用としては、排除体積相互作用がよく知られており、この相互作用から配向の効果が表れるのだが、排除体積相互作用からだとフィラメントが集まったクラスター形成され実験結果のような大域的な回転運動が現れないことが分かった(図 3(C,D))。これは、フィラメント間が衝突する際に、ぶつからずに上下に重なってすり抜けることを示している。実験データの画像解析からフィラメントの運動をトラッキングし、実際にすり抜けが起きていること、フィラメントが一分子で回転運動を示すことも明らかにし、理論と整合する結果が得られた。本結果は Softmatter 誌に掲載されている。この共同研究は、実験データをもとに理論モデルと構築・解析しつつ、その結果をさらに実験側にフィードバックして、画像解析手法を共同で開発するといった双方向の研究により非常によい結果が得られたと考えている。

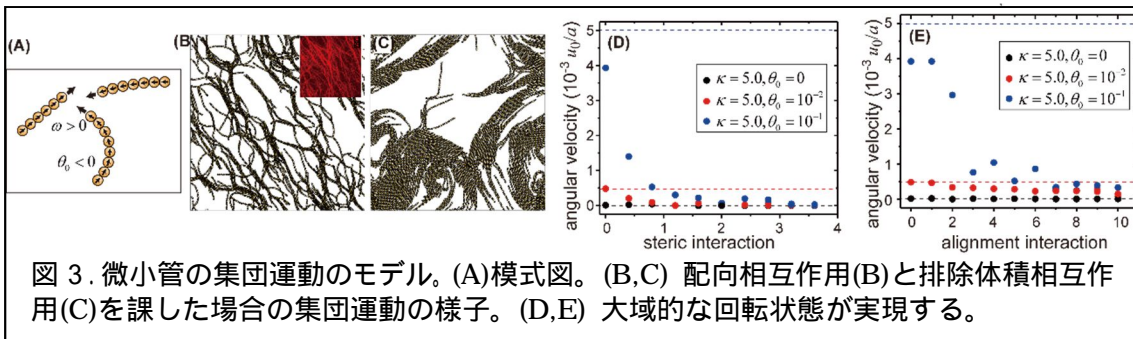


図 3. 微小管の集団運動のモデル。(A) 模式図。(B, C) 配向相互作用(B)と排除体積相互作用(C)を課した場合の集団運動の様子。(D, E) 大域的な回転状態が実現する。

より細胞に近い環境を考え、慶応大学の藤原講師と光山博士の実験グループと共同で Min たんぱく質が作る波のパターン形成についての研究も進めていた。Min たんぱく質は、大腸菌の細胞分裂の中心を決めるために重要な役割を果たす。MinD と MinE の二種類のたんぱく質が細胞内と膜面を行き来することによって自発的に波を形成する。この波が定在波の時にはその節が分裂面として選択される。それだけではなく、この波は、他のたんぱく質を輸送したり、膜面の変形を誘導するなどの現象が最近報告されている。実験的には、人工膜をエマルジョンの界面に用意し、必要なたんぱく質を封入することで自発的に波の形成が観察される。この実験は、細胞環境で閉じ込めた状態で Min たんぱく質の波を観測した世界で初めての実験である。理論的には、球面とその内部にたんぱく質濃度を持つ反応拡散系としてモデル化し、実際に波が形成することを示した(図 4)。定在波だけではなく、回転波も得られることを理論的に明らかにしている。また、閉じ込めの効果によって波が出現する条件が変化することを理論的に示した。上記の理論手法を応用し、バルクに対応する細胞質の自由度を消去して膜面だけのダイナミックに縮約する手法を開発した。この実験と理論の結果は eLife 誌に掲載されている。

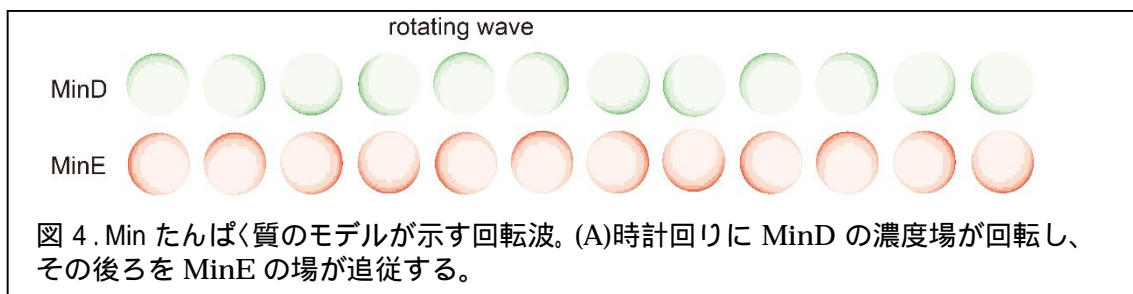


図 4. Min たんぱく質のモデルが示す回転波。(A) 時計回りに MinD の濃度場が回転し、その後ろを MinE の場が追従する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kohyama Shunshi、Yoshinaga Natsuhiko、Yanagisawa Miho、Fujiwara Kei、Doi Nobuhide	4. 巻 8
2. 論文標題 Cell-sized confinement controls generation and stability of a protein wave for spatiotemporal regulation in cells	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 eLife	6. 最初と最後の頁 e44591
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7554/eLife.44591	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 Yoshinaga Natsuhiko	4. 巻 150
2. 論文標題 Self-propulsion of an active polar drop	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Journal of Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 184904 - 184904
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5090790	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 Kim Kyongwan、Yoshinaga Natsuhiko、Bhattacharyya Sanjib、Nakazawa Hikaru、Umetsu Mitsuo、Teizer Winfried	4. 巻 14
2. 論文標題 Large-scale chirality in an active layer of microtubules and kinesin motor proteins	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Soft Matter	6. 最初と最後の頁 3221 ~ 3231
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1039/C7SM02298K	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 Yoshinaga Natsuhiko、Liverpool Tanniemola B.	4. 巻 41
2. 論文標題 From hydrodynamic lubrication to many-body interactions in dense suspensions of active swimmers	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The European Physical Journal E	6. 最初と最後の頁 76
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1140/epje/i2018-11683-x	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 Hiroyuki Kitahata and Natsuhiko Yoshinaga	4. 巻 148
2. 論文標題 Effective diffusion coefficient including the Marangoni effect	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Journal of Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 134906
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5021502	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 Natsuhiko Yoshinaga and Tanniemola B. Liverpool	4. 巻 96
2. 論文標題 Hydrodynamic interactions in dense active suspensions: From polar order to dynamical clusters	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Phys. Rev. E	6. 最初と最後の頁 020603(R)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.96.020603	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 Natsuhiko Yoshinaga	4. 巻 86
2. 論文標題 Simple Models of Self-Propelled Colloids and Liquid Drops: From Individual Motion to Collective Behaviors	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 J. Phys. Soc. Jpn.	6. 最初と最後の頁 101009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.86.101009	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 義永 那津人	4. 巻 20
2. 論文標題 アクティブマター懸濁液の集団運動	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 アンサンプル	6. 最初と最後の頁 155-160
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.11436/mssj.20.155	査読の有無 無
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 -

[学会発表] 計14件(うち招待講演 6件/うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Natsuhiko Yoshinaga
2. 発表標題 Model Selection of PDE for Targeted Crystalline Patterns
3. 学会等名 A3 Soft Matter Workshop 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Natsuhiko Yoshinaga
2. 発表標題 Collective behaviours of dense active suspensions: the role of hydrodynamic lubrication
3. 学会等名 CECAM Workshop Emerging behaviour in active matter: computational challenges (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Natsuhiko Yoshinaga
2. 発表標題 Geometric control of wave instability in Min oscillations
3. 学会等名 Tohoku-Lorraine Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Natsuhiko Yoshinaga
2. 発表標題 Cell-sized confinement controls generation and stability of a protein wave for spatiotemporal regulation in cells
3. 学会等名 ReaDiNet 2019, Mathematical analysis for biology and ecology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 義永 那津人
2. 発表標題 アクティブ結晶液晶の自発運動
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 義永 那津人
2. 発表標題 流体力学を伴う液滴の自発運動と相互作用
3. 学会等名 日本応用数理学会 2018年度年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 義永 那津人
2. 発表標題 キネシンによって駆動された微小管の集団回転運動
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 義永 那津人
2. 発表標題 Min たんぱく質における波の形成と空間形状
3. 学会等名 数理研 第15回 生物数学の理論とその応用 -次世代の数理科学への展開- (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Natsuhiko Yoshinaga
2. 発表標題 Dynamics of defects in active nematic liquid crystals
3. 学会等名 CSIAM 2018 Annual Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Natsuhiko Yoshinaga
2. 発表標題 Geometric control of wave instability in Min oscillations
3. 学会等名 APEF2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Natsuhiko Yoshinaga
2. 発表標題 Active Soft Materials: Self-propelled motion and its collective behaviours of colloids and liquid drops
3. 学会等名 Modeling and Numerical Analysis of Nonlinear Phenomena: Fluid Dynamics, Motion of Interfaces, and Cell Biology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Natsuhiko Yoshinaga
2. 発表標題 Geometric Control of Wave Instability in Min Oscillations
3. 学会等名 International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2017 (SFS2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 義永 那津人
2. 発表標題 空間形状によるMinたんばく質の非線形波のコントロール
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 義永 那津人
2. 発表標題 空間形状によるMinたんばく質の非線形波のコントロール
3. 学会等名 第55回日本生物物理学会年会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Natsuhiko Yoshinaga and Shunsuke Yanunaka	4. 発行年 2019年
2. 出版社 Royal Society of Chemistry	5. 総ページ数 372
3. 書名 Self-organized Motion: Physicochemical Design based on Nonlinear Dynamics	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>研究代表者による研究内容に関するwebページ http://www.wpi-aimr.tohoku.ac.jp/~yoshinaga/ ResearcherID http://www.researcherid.com/rid/G-3067-2011 ResearchGate https://www.researchgate.net/profile/Natsuhiko_Yoshinaga</p>
--

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
--	---------------------------	-----------------------	----