

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 20 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23740286

研究課題名(和文) アクティブ流動系における同期現象と協動的ダイナミクスの理論

研究課題名(英文) Theory of synchronization and cooperative dynamics in active fluid systems

研究代表者

内田 就也(Uchida, Nariya)

東北大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：10344649

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,700,000円、(間接経費) 510,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では流体力学的相互作用による繊毛や鞭毛の集団運動について数理モデルを構築し、次の結果を得た。繊毛の剛体回転子モデルを構築し、繊毛のペアおよび1次元、2次元配列におけるダイナミクスを解析した。繊毛の駆動力のパターン、基盤からの距離、軌道の形状や傾き、繊毛の柔軟性に依存して、多様な同期状態、進行波パターンが生じることを示した。またバクテリアカーペットにおける多数の鞭毛による協動的輸送現象を数値的に解析した。また一般的な長距離相互作用による集団同期転移の特性を場の理論的手法により明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this project we constructed mathematical models of collective motion of cilia and flagella due to hydrodynamic interactions, and obtained the following results. We constructed a rigid-body rotor model of cilia and analyzed their dynamics in a pair and in one- and two-dimensional arrays. We showed that various synchronized states and traveling wave patterns arise depending on the pattern of the driving force, distance from the substrate, orbital shape and inclination, and flexibility of the cilia. We also numerically analyzed the collective transport phenomena due to many flagella in a bacterial carpet, and clarified the properties of collective synchronization transition due to a general class of long-range interactions by a field-theoretic method.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・数理物理・物性基礎

キーワード：自己組織化 流体 生物物理

## 1. 研究開始当初の背景

大腸菌やゾウリムシなどの単細胞生物は、鞭毛や繊毛などフィラメント状の運動器官を用いて水中を泳ぐ。一つの細胞が複数の鞭毛または繊毛を持ち、それらの協同的な運動により泳動を制御していることが多い。また最近これらの自己泳動細胞をモデルとして、多数の素子の協同的な運動を利用したマイクロ流動デバイスが考案されている。これらの協同運動は、自己泳動素子間の流体力学相互作用によって自発的に誘起されると考えられている。本研究開始当初、繊毛のモデルとしては、繊毛の重心自由度を剛体球で表現し、平面基盤から延びた腕に支えられて一定の軌道上を回転する剛体球として扱ったものがあつた。また多数の鞭毛バクテリアをエラストマーに張り付けたバクテリアカーペットについては、複雑かつ非定常な渦状の流れパターンが生じるという実験結果および応募者らによる剛体球モデルがあつた。また流体力学相互作用を含めた一般の長距離相互作用による集団同期現象について、空間次元が大きくなると転移の様相が定性的に変化し、さらに転移そのものが消失するという理論的結果が知られていた。

## 2. 研究の目的

(1) 繊毛のモデルの構築と解析 繊毛の複雑な回転運動のモデルとして、駆動力が時間または位相の関数として変動する回転子の協同的ダイナミクスを解析し、メタクロナル波の発生条件を考察する。特に流体力学相互作用の異方性に着目し、スカラー性の相互作用では起こらない新しい同期メカニズムを探索する。

(2) バクテリアカーペットのモデルの構築と解析 上記ミニマルモデルを拡張し、鞭毛の方向自由度が制限的3次元回転であることを考慮したランダム場モデルを構築し、実験で観測されている短距離方向秩序や流動パターンを数値計算により再現する。またバクテリアの排除体積効果を考慮し、より詳細な実験との比較を行う。

(3) 長距離結合振動子系の多体理論の拡張と数値解析 固有振動数のランダム性がもたらす同期・非同期転移及び、位相遅れに伴うラセン波について、相互作用のべき指数や空間次元に対する依存性を解析する。これには応募者が既に開発した摂動論の高次への拡張や、数値解析を併用する。また、得られた知見を元に、流体系のジオメトリを変えることにより同期現象を制御する可能性を探る。

## 3. 研究の方法

### (1) 繊毛のモデル

繊毛の平泳ぎ的な運動(水をかく時と戻る時で駆動力が異なる)を表現するため、既に応

募者らが開発したミニマルモデルに、アクティブ力(の大きさ及び角度)が位相の関数として変動するように拡張を行う。この回転子が2個、直線上、および平面上に配列した系について、線形安定性解析によって同期状態や1次元の波動パターン(メタクロナル波)の安定条件を調べる。さらに数値計算によってこれらの状態を再現し、ラセン波などより複雑なパターンも含めた動的相図を描く。

### (2) バクテリアカーペットのモデル

既存のミニマルモデルが平面内の自由な回転を許すモデルだったのに対して、実際のバクテリアカーペットでは鞭毛の方向は3次元的回転が可能である。一方また、細胞本体と接着していることから自由に回転することはできない。これらの要素を表現するため、3次元球面上に拘束された剛体球(鞭毛の重心)が動径方向にアクティブ力を及ぼすモデルを構築する。回転自由度の制限を表現するため、鞭毛の方向は各回転子ごとにランダムに異なる方向を好むようなポテンシャルに従うとする。このような回転子が多数、平面基盤上に配列したモデルの数値シミュレーションを行うことにより、鞭毛の方向相関や流体の速度場を計算し、実験で観察されている短距離方向秩序相や、渦状、直線状の流動パターンの再現を試みる。

### (3) 長距離結合振動子系の一般理論

既に応募者が開発した摂動論的方法に基づき、秩序変数の高次の空間相関まで取り入れた解析を行う。また、1次元および2次元格子の場合について数値計算を行い、その結果を理論的結果と比較して摂動理論の有効範囲を検討する。また相互作用のべき指数が大きくなると同期現象は局所的なものとなりマクロな系の同期は起こらなくなると考えられる。その閾値を数値解析により決定し、強結合極限での線形理論の予測と比較する。

## 4. 研究成果

本研究課題では流体力学的相互作用による繊毛や鞭毛の集団運動について数理モデルを構築し、次の結果を得た。繊毛の剛体回転子モデルを構築し、繊毛のペアおよび1次元、2次元配列におけるダイナミクスを解析した。繊毛の駆動力のパターン、基盤からの距離、軌道の形状や傾き、繊毛の柔軟性に依存して、多様な同期状態、進行波パターンが生じることを示した。またバクテリアカーペットにおける多数の鞭毛による協同的輸送現象を数値的に解析した。また一般的な長距離相互作用による集団同期転移の特性を場の理論的手法により明らかにした。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に

は下線)

〔雑誌論文〕(計3件)

Nariya Uchida and Ramin Golestanian, Hydrodynamic synchronization between objects with cyclic rigid trajectories, European Physical Journal E 35, 135-1-135-14 (2012) 査読あり

内田就也

流体力学的同期現象: 鞭毛や繊毛の集団運動の理解に向けて, 日本物理学会誌 67, 754-757 (2012) 査読あり

内田就也

低レイノルズ数における流体力学的同期現象: ミニマルアプローチ, 数理解析研究所講究録 1808, 78-87(2012) 査読なし

〔学会発表〕(計17件)

Nariya Uchida, Ramin Golestanian, 繊毛メタクロナル波のミニマルモデル(口頭), 日本物理学会 2013 年秋季大会(2013 年 9 月 25 日~28 日, 徳島市)

Nariya Uchida, Ramin Golestanian, Hydrodynamic synchronization and collective dynamics of rigid-body rotors (ポスター), Dynamics of Suspensions, Gels, Cells and Tissues (2013 年 6 月 24 日~28 日, ケンブリッジ, イギリス)

Nariya Uchida, Ramin Golestanian, Synchronization of flagella and cilia by hydrodynamic interactions: minimal approaches (ポスター), Active Soft and Biological Matter: A Conference in honour of Jacques Prost(2012 年 9 月 30 日~10 月 5 日, レズーシュ, フランス)

Nariya Uchida, Ramin Golestanian, Hydrodynamic Synchronization and Collective Dynamics of Microfluidic Rotors, Japanese-German-French Workshop "Physics of Active Soft Matter"(2012 年 9 月 24 日~25 日, ハイデルベルク, ドイツ)

内田就也,

鞭毛や繊毛の流体力学相互作用による同期: ミニマルアプローチ(口頭), 第 50 回日本生物物理学会(2012 年 9 月 22 日~24 日, 名古屋市)

内田就也,

マイクロ流動回転子の同期現象と集団動力学, The 2nd Workshop on "Fracture, Cracking, Dislocation" (2012 年 8 月 31 日~9 月 1 日, 札幌市)

内田就也,

繊毛メタクロナル波のミニマルモデル(ポスター), 非平衡系の物理-その普偏的理解を目指して(2012 年 8 月 1 日~4 日, 京都市)

Nariya Uchida, Ramin Golestanian, Hydrodynamic synchronization at low Reynolds number: minimal approaches (口頭), Topical Research Meetings on Physics: Swimming and Complexity at Low Reynolds Number(2012 年 6 月 7 日~8 日, ロンドン, イギリス)

内田就也,

低レイノルズ数における流体力学的同期現象: ミニマルアプローチ(口頭), 生物流体力学における同期および関連する現象(2012 年 5 月 21 日~23 日, 京都市)

内田就也,

長距離結合振動子系の集団同期転移(口頭), 日本物理学会第 67 回年次大会(2012 年 3 月 24 日~27 日, 西宮市)

Nariya Uchida,

Minimal models of hydrodynamic synchronization and the collective dynamics of flagella and cilia (口頭), Phase Transition Dynamics in Soft Matter: Bridging Microscale and Mesoscale (2012 年 2 月 20 日~22 日, 京都市)

Nariya Uchida, Ramin Golestanian, 流体力学的同期現象のミニマルモデル-繊毛や鞭毛の協同運動の理解に向けて-(口頭), 日本機械学会第 24 回バイオエンジニアリング講演会(2012 年 1 月 7 日~8 日, 豊中市)

Nariya Uchida, Ramin Golestanian, Minimal Models of Hydrodynamic Synchronization at Low Reynolds Number (ポスター), International Symposium on Complex Systems (2011 年 12 月 1 日~2 日, 文京区)

Nariya Uchida, Ramin Golestanian, 流体力学的同期現象のミニマルモデル(口頭), 日本物理学会 2011 年秋季大会(2011 年 9 月 21 日~24 日, 富山市)

Nariya Uchida, Ramin Golestanian, 流体力学的同期現象のミニマルモデル(ポスター), 非平衡系の物理-ミクロとマクロの架け橋-(2011 年 8 月 18 日~20 日, 京都市)

Nariya Uchida, Ramin Golestanian, 流体力学的同期現象のミニマルモデル- 鞭毛や繊毛の集団運動の理解に向けて-(口頭), 生物ロコモーションと同期現象(2011 年 8 月 16 日~20 日, 北海道茅部郡森町)

Nariya Uchida, Ramin Golestanian,  
流体力学的同期現象のミニマルモデル(口頭), 第1回ソフトマター研究会(2011年8月3日~5日、京都市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

内田 就也(東北大学・大学院理学研究科・助教) 研究者番号: 10344649