

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：32612
研究種目：基盤研究(B)（一般）
研究期間：2021～2023
課題番号：21H01007
研究課題名（和文）自己駆動する集団におけるカイラル輸送現象の研究

研究課題名（英文）Chiral transport phenomena in active matters

研究代表者

早田 智也（HAYATA, Tomoya）

慶應義塾大学・経済学部（日吉）・助教

研究者番号：50762655

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,200,000円

研究成果の概要（和文）：アクティブマターと呼ばれる自己駆動する粒子の集団において、集団を構成する粒子がもつミクロなカイラリティ(キラリティ)により生じるマクロな輸送現象(カイラルな輸送現象)を実験的に発見し、理論的にミクロな機構を解明した。さらに、実験と理論の間の定量的な比較を進め、実験量から理論モデルのパラメータを決定する方法を確立し、実験的に決定した理論モデルを用いて予測を与える枠組みを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

アクティブマターの精密な実験系とその定量的な理論モデルの両方を確立したことは非平衡統計力学の基礎研究を今後進めていく上で非常に重要な進展であったと考える。
また、本研究で得られたagent-based modelに基づく数値計算のノウハウは例えばナノロボットなど高機能物質を人工的に設計する際の理論的な枠組みとして生かすことができるなど、将来的な工学的应用を通じて社会的な意義があると考えられる。

研究成果の概要（英文）： We experimentally found a chirality-driven collective motion in active matters, and revealed the microscopic mechanism based on an agent-based model. Through quantitative comparison between experiments and numerical simulations based on an agent-based model, we construct a method to determine parameters of an agent-based model from experimental observables and make a theoretical prediction based on the agent-based model obtained from experiments.

研究分野：物理学

キーワード：アクティブマター カイラリティ トポロジー 液晶

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

環境もしくは自己の持つ自由エネルギーを消費し運動エネルギーへと転換することで、外力に駆動されることなく自律的に動く集団をアクティブマターと呼ぶ。アクティブマターの例は、交通流、鳥や魚の群れからコロイド粒子、生体細胞、分子モーターまで幅広いスケールの世界にわたる。これらの系では、構成要素が自ら運動エネルギーを作り出すために、発現する現象は本質的に非平衡である。実際、平衡系では起き得ない自発的対称性の破れ、異常な大自由度ゆらぎ、超拡散現象などの現象が起きることが報告されている。

実験技術の革新的向上を契機として、近年、アクティブマターにおける普遍的な学理を探求する研究が急速に発展している。これらの研究は大まかに以下の3つに分類することができる：

- ・ 非平衡統計力学の基礎理論を構築する
- ・ 生命現象を物理学的手法から理解、分類する
- ・ (生体系を模倣した)高機能物質を人工的に設計する

これら全ての研究に共通する課題が輸送現象である。系に電磁場、熱勾配、圧力等の外場を加えてその応答を調べることは物性物理学の基本である。しかしながら、アクティブマターでは構成粒子自らが駆動の役割を果たすことで、外場を伴わない自発的な輸送が生じる。ではアクティブマターにおける輸送現象の基本法則とは何だろうか？本研究課題の核心をなす学術的な問いを以下にまとめる：

- ・ アクティブマターにおける輸送現象は平衡系のそれと本質的に異なるのか？
- ・ 自己駆動特有の輸送現象は存在するのか？
- ・ 自己駆動輸送現象は実際の系でどのような役割を果たすのか？

これらの問いに答えることを目標として本研究は行われた。

2. 研究の目的

本研究は、アクティブマターにおいて、集団を構成する粒子がもつミクロなカイラリティ(キラリティ)に起因して生じるマクロな電荷、運動量、熱などの輸送現象、すなわち、アクティブカイラル輸送現象を対象とし、その目的は、アクティブカイラル輸送現象の基礎理論、すなわち、アクティブカイラル輸送理論を構築することである。

上記学術的な目的を達成するための手段(技術的な目的)として、細胞間多体相互作用を記述するミクロな理論(数値実験)、流体方程式に基づくマクロな理論(トポロジーを用いた数理解析)、および神経幹細胞を用いた生物物理実験の数値実験、数理解析、実験の三者間で相互に補完しながら研究を進めていく枠組みの開発を行なった。

3. 研究の方法

本研究は Vicsek 模型と呼ばれる細胞間多体相互作用を記述するミクロな理論の数値シミュレーション、Vicsek 模型を連続体近似して得られるアクティブ流体力学に基づくマクロな理論のトポロジーを用いた解析、神経幹細胞系を用いた実験3つのグループの間で互いにフィードバックしながら研究を進める。以下それぞれの研究方法をまとめる。

[ミクロな理論]

神経幹細胞の実験と定量的にも対応する2次元のカイラルネマティック相互作用するVicsekモデルを用いてトポロジカル欠陥のダイナミクスを数値的に調べる。

また、実験における測定量との定量的な比較から、ミクロなモデルのパラメータを実験的に決定する手法を開発する。

[マクロな理論]

抽象化された細胞は上下左右を区別しない棒状の物体と見なせるので、細胞の集団はネマティックな秩序(棒の配向の秩序)を持ち得る。さらに細胞は運動するので、細胞が同じ向きに一齐に運動すれば、マクロな流れの秩序(ポラー秩序)が現れる。細胞の集団はこれら2つの秩序を同時に扱えるような流体理論を用いて記述する必要がある。

ミクロな理論を粗視化して得られる流体方程式を、定常流周りで線形化して得られる(実験とも直接関連する)モデルを元に、周期性のない、非エルミートな系での正しいトポロジカル不変量の計算方法およびそのトポロジカル不変量を用いたバルク・エッジ対応を明らかにする。

[生物物理実験]

神経幹細胞の実験系とミクロ・マクロな理論モデルとの関係を明瞭にするため、理論班と議論を深めつつ測定・画像解析系を改善する。具体的には、細胞運動ダイナミクスの画像解析から持続長や反転ダイナミクスの確率性を定量し、牽引力顕微鏡(Traction Force Microscopy)という手法を用いて細胞間相互作用のカイラリティの強さを測定するなど、ミクロモデルとの対応を明確にする。さらに、細胞集団レベルの運動から相関関数などを測定し、連続体方程式のパラメータを推定することで、マクロモデルとの対応もつける。

4. 研究成果

本研究で発見した現象とそれらにおける理論および実験の研究成果をまとめる。

カイラルエッジカレント

まず神経幹細胞の実験において、神経幹細胞は固有のカイラリティを有する(右回りもしくは左回り運動をする)こと、神経幹細胞を矩形領域や円形領域など様々な形の培地上で培養させると、細胞のカイラリティに依存する端に局在した細胞の流れが生じることを発見した。さらに実験を進め、細胞骨格阻害剤などの薬剤を用いてカイラリティを制御することに成功し、この現象が確かに細胞のカイラリティに関係していることが明らかになった。具体的には細胞のカイラリティをコントロールしながら細胞流を測定する方法を開発し、カイラリティの強さ(特に符号)と細胞流の向きや局在性との間の関係を定量化した。

次に、実験で発見した細胞の局在流(カイラルエッジカレント)を定量的に説明するミクロなモデルの構築を行なった。具体的には、神経幹細胞のミクロな運動を定量的に再現するagent-based modelにカイラリティの効果を取り入れて拡張し、そのモデルを数値的に調べることで、実験で得られたカイラリティの強さ(特に符号)と細胞流の向きや局在性との間の関係を定量的に再現できるモデルを構築した。このモデルを理論的に解析することで、実験においてカイラルエッジカレントが安定的に流れる現象のミクロな機構(物理的な説明)を明らかにした。

さらに、ミクロな理論を粗視化して得られる流体方程式をトポロジーを用いて解析することで、カイラルエッジカレントのトポロジー的な側面をトポロジカル物性のバルク・エッジ対応に基づいて説明した。

トポロジカル欠陥に駆動された細胞の集積現象

実験で発現した位相欠陥に細胞が集積する現象のミクロな機構を解明する研究を行なった。まず、実験は全細胞のダイナミクスのトラッキングから細胞間の相関の測定を行う方法を確立した。細胞のトラッキング技術を向上させることで、細胞間の相関関数の長時間かつ精密な測定が可能になった。これが次の理論的な解析のインプットとして非常に重要な役割を果たした。

次に、測定した相関を再現するように agentbased model のパラメータを決定する逆問題を解くことで（機械学習により）ミクロな模型のパラメータを決定する方法を構築した。具体的には実験から与えられる相関関数を再現するように理論のパラメータを最適化する逆問題を解いて、ミクロな模型のパラメータを実験量から決定する手法を確立した。従来の agentbased model は等方的なネマチック相互作用を仮定しているが、位相欠陥周りの細胞の集積ダイナミクスを正しく記述するためには、非等方かつ非相反な相互作用が必要であることがこの解析から明らかになった。

さらに得られた理論モデルを用いて、例えば球面上に細胞を閉じ込めるなど問題としては興味深い実験を行うには難しいような状況や、将来的に実験可能な現実即ち状況を含めた様々な環境での数値シミュレーションを行い、位相欠陥に細胞が集積する現象が空間のトポロジーや曲率によりどのように変化するかを解析した。これまでは実験ドリブンで実験で得られた結果を説明するミクロな模型を構築していたが、定量的に信頼できる理論モデルを得たことにより、数値シミュレーションの結果から面白い実験を提案するなど理論ドリブンで研究を進めることが徐々に可能になってきた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件／うち国際共著 2件／うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Tajima Hiroyuki, Sekino Yuta, Inotani Daisuke, Dohi Akira, Nagataki Shigehiro, Hayata Tomoya	4. 巻 6
2. 論文標題 Non-Hermitian p-wave superfluid and effects of the inelastic three-body loss in a one-dimensional spin-polarized Fermi gas	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevResearch.6.023060	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 Hayata Tomoya, Nakayama Katsumasa, Yamamoto Arata	4. 巻 109
2. 論文標題 Dynamical chirality production in one dimension	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.109.034501	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 Ozawa Tomoki, Hayata Tomoya	4. 巻 109
2. 論文標題 Two-dimensional lattice with an imaginary magnetic field	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.109.085113	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 Hayata Tomoya, Hidaka Yoshimasa	4. 巻 2023
2. 論文標題 String-net formulation of Hamiltonian lattice Yang-Mills theories and quantum many-body scars in a nonabelian gauge theory	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-24
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP09(2023)126	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 Hayata Tomoya, Hidaka Yoshimasa	4. 巻 2023
2. 論文標題 q deformed formulation of Hamiltonian SU(3) Yang-Mills theory	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP09(2023)123	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 Hayata Tomoya, Nakayama Katsumasa, Yamamoto Arata	4. 巻 108
2. 論文標題 Chiral fermion in the Hamiltonian lattice gauge theory	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.108.034511	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 Faugno W. N., Salerno Mario, Ozawa Tomoki	4. 巻 132
2. 論文標題 Density Dependent Gauge Field Inducing Emergent Su-Schrieffer-Heeger Physics, Solitons, and Condensates in a Discrete Nonlinear Schrodinger Equation	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.132.023401	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 Hayata Tomoya, Hidaka Yoshimasa, Yamamoto Arata	4. 巻 2023
2. 論文標題 Dissipation-induced dynamical phase transition in postselected quantum trajectories	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptad007	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 Tajima Hiroyuki, Sekino Yuta, Inotani Daisuke, Dohi Akira, Nagataki Shigehiro, Hayata Tomoya	4. 巻 107
2. 論文標題 Non-Hermitian topological Fermi superfluid near the p-wave unitary limit	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.107.033331	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 Faugno W.N., Ozawa Tomoki	4. 巻 129
2. 論文標題 Interaction-Induced Non-Hermitian Topological Phases from a Dynamical Gauge Field	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.129.180401	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 Hayata Tomoya, Yamamoto Arata	4. 巻 104
2. 論文標題 Non-Hermitian Hubbard model without the sign problem	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.125102	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 Hayata Tomoya, Hidaka Yoshimasa, Yamamoto Arata	4. 巻 2022
2. 論文標題 Lattice Lindblad simulation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptac062	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19件（うち招待講演 14件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 川口 喬吾
2. 発表標題 Interaction rules within multicellular dynamics and biological condensates
3. 学会等名 第60回 生物物理学会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川口 喬吾
2. 発表標題 Chirality in the collective migration of neural progenitors
3. 学会等名 World Congress of Biomechanics（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川口 喬吾
2. 発表標題 Topology and active matter physics in cultured nematic cells
3. 学会等名 World Congress of Biomechanics（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川口 喬吾
2. 発表標題 細胞間相互作用の異方性とキラリティとアクティブマター
3. 学会等名 日本細胞生物学会大会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川口 喬吾
2. 発表標題 Probing the rules of interaction in biological agents
3. 学会等名 OIST Workshop: Cells, energetics, and information (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川口 喬吾
2. 発表標題 Properties of cell-cell interactions shaping multicellular dynamics
3. 学会等名 Japan-Singapore Joint Developmental Biology Meeting 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川口 喬吾
2. 発表標題 細胞集団運動とトポロジー
3. 学会等名 KEK IPNS-IMSS-QUP Joint workshop (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川口 喬吾
2. 発表標題 Active matter physics in multicellular dynamics and quantum models
3. 学会等名 アクティブマター研究会2022 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 早田 智也
2. 発表標題 非エルミートハバード模型の 量子モンテカルロ計算
3. 学会等名 格子上の場の理論と連続空間上の場の理論
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 早田 智也
2. 発表標題 ゲージ理論の実時間発展
3. 学会等名 場の理論の新しい計算方法2022 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 早田 智也
2. 発表標題 非エルミートハバード模型における界面粗さ成長と動的スケーリング
3. 学会等名 熱場の量子論とその応用
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 早田 智也
2. 発表標題 格子ゲージ理論における量子多体傷跡状態
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川口 喬吾
2. 発表標題 細胞集団運動とトポロジー
3. 学会等名 基研研究会「開放系トポロジーの探求」(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川口 喬吾
2. 発表標題 Graph-based machine learning and statistical physics for tissue homeostasis
3. 学会等名 2021 NCTS Physics in Complex Systems Workshop, National Taiwan University (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川口 喬吾
2. 発表標題 生命現象と多体系物理 流れる細胞集団、ターンオーバーする組織
3. 学会等名 高遠シンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川口 喬吾
2. 発表標題 恒常性・発生動態における 細胞運命決定のルール推定
3. 学会等名 日本細胞生物学会(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 早田 智也
2. 発表標題 非平衡ハバード模型の量子モンテカルロシミュレーション
3. 学会等名 熱場の量子論とその応用
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 早田 智也
2. 発表標題 Sign-free real-time quantum Monte Carlo
3. 学会等名 場の理論の量子計算2022 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 早田 智也
2. 発表標題 非エルミートハバード模型の量子モンテカルロ計算
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究 分担者	川口 喬吾 (Kawaguchi Kyogo) (00787319)	国立研究開発法人理化学研究所・開拓研究本部・理研白眉研究チームリーダー (82401)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究 分 担 者	小澤 知己 (Ozawa Tomoki) (80825993)	東北大学・材料科学高等研究所・准教授 (11301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関