

令和 6 年 5 月 2 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K03874

研究課題名（和文）アクティブマターの集団運動における実効的なアクティブストレスの理解

研究課題名（英文）Effective active stress in collective behaviours of active matters

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）：本研究ではactive matterの集団運動の解析を理論と数値シミュレーションを用いて行った。特に、自発的に運動する粒子の微視的なダイナミクスからどのようにマクロな量を結びつけるのかについて注目して研究を行った。まず、細菌の集団運動で、高密度中のアクティブ粒子の実効的な拡散係数と外力に対するマクロな応答について、粒子濃度依存性について、数値シミュレーションによる計算と平均場による解析を行った。また、実験結果とも定性的により一致を得ることができた。また、機械学習を用いて、粒子のダイナミクスから粗視化を行って、マクロな方程式の係数を推定する研究も行った。

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、非平衡状態でエネルギーを消費し環境に散逸しながら秩序を持った集団運動を実現するシステムである。平衡系とは異なり、アクティブマターには自由エネルギーのような最小化するものが一般には存在しないため、自由エネルギーを積分することによってマクロな支配方程式を得ることは困難である。本研究では、ダイナミクスからどのようにマクロな方程式の係数を得ることができるのかについて理解を深めるために行った。本研究で行ったような機械学習の手法と組み合わせることでマクロな方程式が系統的に導出できるようになれば、階層性のある現象についての理論的・計算科学的解析手法が広がるのではないかと考えている。

研究成果の概要（英文）：In this project, we have performed numerical simulations and theoretical analyses for collective behaviours of active matters. A particular focus is on how the microscopic dynamics of self-propelled particles are related to macroscopic quantities. We have performed numerical simulations and mean-field-type analyses for the collective motions of bacteria and computed effective diffusion constants and macroscopic responses to external fields. The results were compared with experiments, and we found a qualitative agreement. We have also studied, using machine-learning techniques, coarse-graining and estimation of parameters in macroscopic equations from the data of microscopic particle dynamics.

研究分野：ソフトマターの物理学

キーワード：アクティブマター 非平衡物理 生物物理 自己駆動粒子 非線形ダイナミクス 集団運動

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

アクティブマターは、内部にエネルギー源を持った粒子が自己駆動するメカニズムや、多数の自己駆動粒子が示す集団運動の解明を目指す分野である。これらの現象は多岐にわたり、細菌や細胞の集団運動のような生命現象から、Janus 粒子と呼ばれる異なった性質の表面を持つ粒子でも、自己駆動粒子の集団運動が観測されている。自己駆動のメカニズムについては、単純な数理モデルを用いたものから、粒子の周囲の流体運動や化学物質の濃度を取り入れたモデルまで研究が発展してきており、最近では、細胞運動のような複雑な運動や変形を再現するモデルも提案されている。このような自発的に運動する粒子が多数集まって集団挙動を示す時には、平衡状態の相転移のような、大きなスケールでの集団運動の質的な変化が観測されている。従って、アクティブマターの集団運動にも何らかの普遍性が期待されている。どのような普遍性を持つかは、系の対称性や構成要素に依存すると考えられるが、その一般的な理解は未だ存在しない。そこで、現象論的にマクロスケールでの連続体記述によってアクティブマターの集団運動の性質を理解しようとする試みがなされてきた。集団運動の解析は、(i) 各粒子の運動をモデル化し、シミュレーションによってパラメーターやモデルの各項が集団運動に与える影響を調べる、(ii) 現象論的に連続体方程式を導出し解析する、に分けることができる。前者の方法では、自己駆動や相互作用の詳細、また流体相互作用の効果を比較的厳密に取り入れることができるが、モデルの中の自由度が多いため集団運動の解析はほとんど数値計算に限定されている。後者の手法では、ミクロなモデルの詳細に依存しない比較的一般的な物理メカニズムを考察することができる一方で、方程式に現れるパラメーターは現象論的であり、その値がどうなるのかを正当化することは困難である。

我々はこれまで、自己駆動粒子の理論解析を行ってきており、squirmers 粒子や Janus 粒子と呼ばれる周囲の流体運動を形成して自発的運動を示す系について、1 粒子レベルの運動について理論的に明らかにしてきた。また、squirmers 粒子に関しては、自己駆動誘起相分離現象 (MIPS) や一様配向状態 (Vicsek 相転移) が得られることを明らかにしてきた。しかし、対応する連続体モデルの正当性やパラメーターが不明で、実際に、従来の連続体モデルでは説明できない現象がシミュレーションから明らかになってきている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、マクロな方程式に現れるアクティブストレスや拡散係数などを、粒子スケールの情報から得ることである。従来の研究では、微視的な粒子モデルから、近似的にメソスケールの方程式 (ボルツマン方程式やフォッカー-プランク方程式) を導出し、それをさらに展開することで連続場の方程式が得られてきた。典型的には、多数の粒子の位置と向きに対する微視的モデルから、密度場と配向場に対する非線形偏微分方程式が導出されてきている。この手法では様々な近似が入ることからその正当性を一般的な状況で担保することが困難であり、また、計算が非常に煩雑なため微視的なモデルが複雑になると、マクロな方程式を導出することが困難になってしまう。そこで、微視的なダイナミックスのデータからマクロな変数を直接計算することを目指した。

3. 研究の方法

(1) 集団運動におけるゆらぎと応答の解析

マクロな方程式において実効的な拡散係数はゆらぎの大きさの指標になっている。孤立した一つのアクティブ粒子では、自己駆動と回転拡散によって拡散係数が決まるが、集団の中では相互作用により拡散係数は密度に対して大きく変化する。そこで、拡散係数が、自己駆動速度、個々の粒子の force dipole、相互作用にどのように依存するのかを数値計算と理論計算の両面から調べていく。アクティブ流体中でのトレーサー粒子の拡散係数の解析が最近行われているが、アクティブ粒子そのものの拡散係数はあまり議論されていない。まず、集団運動における自己駆動粒子の実効的な拡散係数と応答係数の解析を行う。自己駆動粒子のモデルとしてよく知られている Vicsek モデルと Active Brownian 粒子を組み合わせ、排除体積相互作用と配向相互作用を持つ自己駆動粒子を用いて、そこに流体相互作用を入れることによって、高密度でも配向状態が起きないモデルを考察し、このモデルの拡散係数が密度に対してどのような依存性を持つのかを調べた (図 1)。また、同じモデルに外力を加えた時の応答についても解析を行い、密度依存性を調べた。

最近の最近を用いた集団運動の実験では、個々の菌の運動を解析し拡散係数や外力に対する応答を測定できるようになってきている。そこで上記の結果と実験との比較をし、ゆらぎと応答の関係について調べた。

(2) 潤滑相互作用による流体力学的相互作用の遮蔽効果

マクロな方程式であるアクティブ液晶理論では、流体力学的相互作用を入れると一様配向状態が不安定になることが知られている。一方で、粒子レベルでのシミュレーションで流体相互作用の効果を入れると、一様配向が実現することが明らかになってきている。これは、マクロな方程式に近距離の流体潤滑相互作用が適切に取り入れられていないことが原因であると考えられる。実際に、ミクロな粒子モデルのシミュレーションでも潤滑力が一様配向に重要な役割を果たすことを明らかにしてきた。この結果は、流体相互作用の遮蔽効果が存在することを示唆している。

スケールの分離を可能にするため、サイズが大きいアクティブ粒子が希薄に存在し、その周りに小さい粒子が大量に存在する状況を考える全体では高密度なため、通常の希薄展開は適用できないが、小さい粒子を塗りつぶして連続的なアクティブ流体として取り扱うことによって、希薄な粒子の周りがアクティブ流体で囲まれた系を解析すればいいことになる。このような系で、大きな粒子の周りの不均一な配向分布からアクティブストレスが抑えられて流体相互作用が遮蔽されることを理論的に明らかにする。

(3) 機械学習による粗視化

研究を進めていく中で、機械学習の手法がアクティブマターの問題にも使えるのではないかと考えるようになった。そこで、まず、同じスケールにおいて、データからそのスケールを支配する方程式を推定する手法を開発した。次に、微視的な粒子モデルのダイナミクスにおいて、粒子の位置や向きの軌道をデータにし、それを粗視化することによって密度場や配向場のデータを作り、そこから連続場に対する方程式を推定する研究を行った。

4. 研究成果

(1) 集団運動における実効的拡散と外力に対する応答

数値シミュレーションの結果から、密度が大きくなると揺らぎが抑えられる一方で、応答は大きくなることが分かった(図1)。これは、密度が大きくなると配向相互作用により回転拡散が抑えられるためである。一方、応答については、高密度になることによって多数決のように運動方向が決まり、結果として外力を加えた方向に運動する粒子数が増えて応答が上昇するという結果が得られた。一方で、排除体積相互作用をなくすことによって、揺らぎの密度依存性にピークが出ることも分かった。これは、低密度では、粒子のすり抜けによって配向せず衝突によってむしろ散乱を強調することで得られることが分かった。これらの結果は、細菌を用いた実験とも定性的に合っている。

アクティブマターの輸送係数や応答係数が様々な特異性を示すことは、最近理論、実験の両面から議論されている。その中で、粘性が応力に対して非単調性を示すことが実験的に明らかになり、その理論的メカニズムが議論されている。一方、拡散係数に関しては、非単調性はまだ明確には報告されていないが、非単調性が存在することは定性的には認識されている。本研究により、拡散係数が密度の増加に対して非単調な依存性を示す具体的なモデルを構築できたことは大きな発見である。排除体積相互作用がある場合には、平衡でのコロイド粒子と同様に高密度では、コロイド同士がぶつかるために拡散係数は小さくなる。一方、配向相互作用によって粒子がそろって運動する、高密度では、配向相互作用が顕著になり、すべての粒子が同じ方向に向くために、一方向運動の持続長がのびて見かけの拡散係数は大きくなる。ただし、マクロに一方向に運動している。多くの実験系では大きなスケールでは一方向はあまり見られない。これは、例えば流体相互作用によって長距離の配向が不安定化するためである。この効果を取り入れるために、流体相互作用を近似的にモデルに取り入れることで、局所的には配向しているが、大きなスケールで

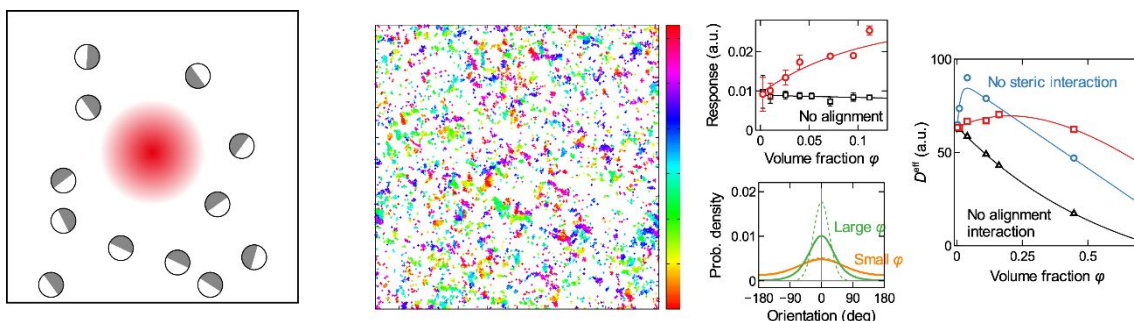


図1 : (左) 中心に温度勾配を与えて中心方向にアクティブ粒子が運動するように外力を加えたモデルの模式図。(中) 排除体積相互作用、配向相互作用、そして流体相互作用を持つアクティブ粒子の集団挙動のスナップショット、色は向きを表す。(右) 密度に対する応答、外力を加えた時の配向分布の変化、そして、密度を変えた時の実効的拡散係数の変化。

は密度が一様で配向していない状態を実現できる。このようなモデルで、局所的な配向に対応して、密度に対して非単調な拡散係数を持つことが分かった。

応答係数についても、配向方向に外力を入れて、固定した方向に向くようにした時の全体の配向度を解析した。その結果、高密度で応答係数が大きくなることが分かった。これは、拡散係数の非単調性と対照的であり、平衡状態のような揺らぎと応答の関係が破れていることを示唆している。本研究で考察したモデルは、アクティブマターの非平衡状態を特徴づけるために有用であるのではないかと考えている。

(2) 流体相互作用の遮蔽効果

二流体モデルを使って、アクティブ粒子が形成する流体相互作用が、近距離の潤滑相互作用によって遮蔽されることを議論した。長距離では、force dipole 的な相互作用を示すのに対して、近距離では発散する潤滑相互作用が摩擦のような役割を果たし、流体相互作用を抑えることができることを示した。

(3) 協同現象に対する機械学習手法の開発

連続的な密度場のデータが与えられた時に、そのデータがどのような連続場の方程式の解に従っているのかについて推定する手法を開発した(図2)。ベイズ推定の枠組みを用いて、生成した構造とデータの構造との差をコスト関数によって定量化して、連続場の方程式の右辺のパラメータの空間でサンプリングを行った。また、モデルの候補として、右辺に現れる項の種類をいくつか用意し、どのモデルがもっともらしいのかのモデル推定も行った。その結果、準結晶状の対称性を持つパターンのデータから、無理数比を持った長さスケールを持つ偏微分方程式の推定に成功し、三次元の問題にも拡張することによって、これまで報告されていなかった三次元十二回対称の準結晶を密度場で初めて表現することができた。

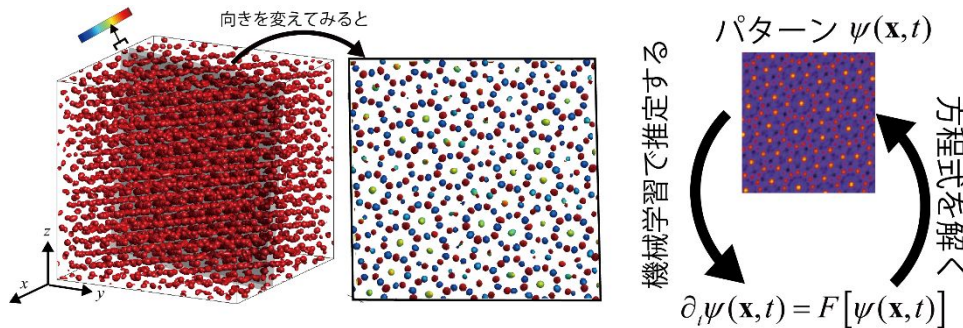


図2:(右)データから支配方程式を推定する問題の模式図。データとして例えば密度場が与えられた時に、その密度場が解になるような方程式を推定する。(左)十二回対称性を持つ準結晶のパターン。これは Frank-Kasper A15 と呼ばれる近似結晶を再現するための方程式とパラメータを推定し、そのモデルから大きな時間・空間スケールで数値計算して得られたものである。

(4) 機械学習による粗視化

前述の手法は、密度場のデータから密度場に対する偏微分方程式を推定する手法であったが、これを拡張することで、粗視化の問題を機械学習で行うことができないか研究を行った。Vicsek モデルや Active Brownian 粒子がそれぞれ配向相転移や相分離を引き起こしている、粒子ダイナミクスをデータにして、それを連続場に変換することによって、得られた連続場のデータから連続場に対する偏微分方程式を推定することを試みた(図3)。

結果として、今まで近似的に粒子モデルから導出されてきた連続場のモデルに含まれる項や現象論的に提案されてきたモデルに含まれる項の多くを推定できることが分かった。特に、Active Brownian 粒子については、配向場に対する方

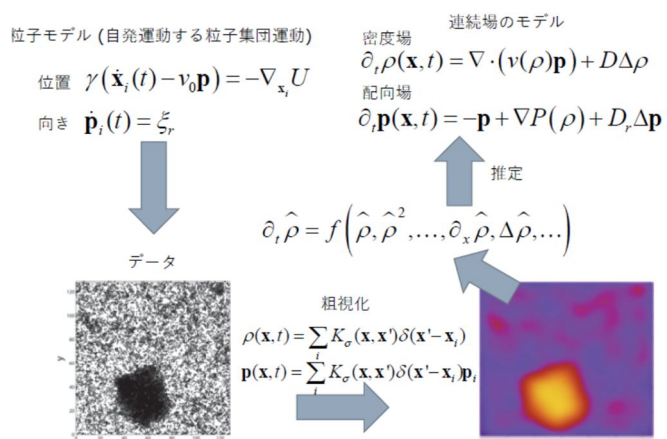


図3: 微視的な粒子モデルのダイナミクスから、粗視化された連続場の方程式を推定する手法の模式図。粒子の位置と向き(左下の図の点)を連続場に変換し、それをデータとして用いて方程式推定の枠組みを用いる。

式の中に、 $\text{div } \mathbf{p}$ という項が推定され、これは粒子の自発的運動によって密度のフラックスが生じることを示している。また、配向場が、密度勾配に比例することも推定結果から分かり、これらの結果を組み合わせることで負の拡散が生じ、一様状態が不安定化して相分離へと至るという結果が得られた。これは機械学習によってデータから自動的に抽出されたものである。一方、Vicsek モデルについては、配向場の方程式に対して、移流項が得られ、その係数がこれまで議論されてきた値に近いものが推定された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 8件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Kai Tatsuro, Abe Takahiro, Yoshinaga Natsuhiko, Nakamura Shuichi, Kudo Seishi, Toyabe Shoichi	4. 巻 -
2. 論文標題 Collective gradient sensing by swimming bacteria without clustering	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 bioarxiv	6. 最初と最後の頁 516991
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1101/2022.11.17.516991	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 -
1. 著者名 Yoshinaga Natsuhiko, Tokuda Satoru	4. 巻 106
2. 論文標題 Bayesian modeling of pattern formation from one snapshot of pattern	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 65301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.106.065301	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 Lieu Uyen Tu, Yoshinaga Natsuhiko	4. 巻 18
2. 論文標題 Formation and fluctuation of two-dimensional dodecagonal quasicrystals	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Soft Matter	6. 最初と最後の頁 7497 ~ 7509
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D2SM00798C	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 Takada Sakura, Yoshinaga Natsuhiko, Doi Nobuhide, Fujiwara Kei	4. 巻 8
2. 論文標題 Mode selection mechanism in traveling and standing waves revealed by Min wave reconstituted in artificial cells	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 eabm8460
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.abm8460	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 Uyen Tu Lieu and Natsuhiko Yoshinaga	4. 巻 156
2. 論文標題 Inverse design of two-dimensional structure by self-assembly of patchy particles	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 54901
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0072234	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 Uyen Tu Lieu and Natsuhiko Yoshinaga	4. 巻 16
2. 論文標題 Topological defects of dipole patchy particles on a spherical surface	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Soft Matter	6. 最初と最後の頁 7667-7675
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D0SM00103A	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 Shunshi Kohyama, Kei Fujiwara, Natsuhiko Yoshinaga, Nobuhide Doi	4. 巻 12
2. 論文標題 Conformational equilibrium of MinE regulates the allowable concentration ranges of a protein wave for cell division	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nanoscale	6. 最初と最後の頁 11960-11970
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D0NR00242A	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 Uyen Tu Lieu and Natsuhiko Yoshinaga	4. 巻 -
2. 論文標題 Dynamic control of self-assembly of quasicrystalline structures through reinforcement learning	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 arXiv	6. 最初と最後の頁 2309.06869
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 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 -

1. 著者名 Gao Yueyuan, Yoshinaga Natsuhiko	4. 巻 448
2. 論文標題 Inverse problems of inhomogeneous fracture toughness using phase-field models	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physica D: Nonlinear Phenomena	6. 最初と最後の頁 133734 ~ 133734
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physd.2023.133734	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 Nishikawa Saki, Sato Gaku, Takada Sakura, Kohyama Shunshi, Honda Gen, Yanagisawa Miho, Hori Yutaka, Doi Nobuhide, Yoshinaga Natsuhiko, Fujiwara Kei	4. 巻 11
2. 論文標題 Multimolecular Competition Effect as a Modulator of Protein Localization and Biochemical Networks in Cell Size Space	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Advanced Science	6. 最初と最後の頁 2308030
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/advs.202308030	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21件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 20件)

1. 発表者名 Natsuhiko Yoshinaga
2. 発表標題 Model Selection of Nonlinear PDEs for Pattern Formation
3. 学会等名 SIAM Conference on Mathematics of Data Science (MDS22) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Natsuhiko Yoshinaga
2. 発表標題 Bayesian Model Selection of Partial Differential Equations for Pattern Formation
3. 学会等名 WCCM-APCOM 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Natsuhiko Yoshinaga and Satoru Tokuda
2. 発表標題 Bayesian Modelling of Phase-Field Crystal Models for Targeted Crystalline Patterns
3. 学会等名 American Physical Society March Meeting 2022, Chicago, USA (hybrid) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Uyen T Lieu and Natsuhiko Yoshinaga
2. 発表標題 Inverse Design of Two-dimensional Self-assembly of Patchy Particles
3. 学会等名 American Physical Society March Meeting 2022, Chicago, USA (hybrid) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Natsuhiko Yoshinaga and Satoru Tokuda
2. 発表標題 Model Selection of Phase-Field Crystal Models for Targeted Crystalline Patterns
3. 学会等名 Materials Research Meeting 2021, Yokohama, Japan (hybrid meeting) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Uyen T Lieu and Natsuhiko Yoshinaga
2. 発表標題 Inverse design of two-dimensional self-assembly of patchy particles
3. 学会等名 Materials Research Meeting 2021, Yokohama, Japan (hybrid meeting) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Natsuhiko Yoshinaga and Satoru Tokuda
2. 発表標題 Bayesian Inference of Phase-Field Crystal Models for Target Crystalline Patterns
3. 学会等名 Meeting of the International Research Network: Open space between aperiodic order and physics & chemistry of materials (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Natsuhiko Yoshinaga and Satoru Tokuda
2. 発表標題 Model Selection of PDE for Pattern Formation
3. 学会等名 25th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM 2020+1), Milano, Italy (online) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Natsuhiko Yoshinaga and Satoru Tokuda
2. 発表標題 Model Selection of Phase-Field Crystal Models for Targeted Crystalline Patterns
3. 学会等名 E-MRS 2021 Spring, Virtual Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Natsuhiko Yoshinaga and Satoru Tokuda
2. 発表標題 Model Selection of PDE for Pattern Formation
3. 学会等名 25th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM 2020+1), Milano, Italy (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Natsuhiko Yoshinaga and Satoru Tokuda
2. 発表標題 Model Selection of Phase-Field Crystal Models for Targeted Crystalline Patterns
3. 学会等名 E-MRS 2021 Spring, Virtual Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 義永那津人、徳田悟
2. 発表標題 ベイズ推定を用いた目的の相分離パターンの支配方程式の推定
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Natsuhiko Yoshinaga
2. 発表標題 Estimation of continuum models for (active) soft materials and data-driven coarse-graining
3. 学会等名 New statistical physics in living matter: non equilibrium states under adaptive control at Isaac Newton Institute for Mathematical Sciences (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Natsuhiko Yoshinaga and Satoru Tokuda
2. 発表標題 Bayesian Model Selection of PDEs for Pattern Formation
3. 学会等名 the 10th International Congress on Industrial and Applied Mathematics (ICIAM2023), Minisymposium "Multiscale Pattern Formation" (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Natsuhiko Yoshinaga
2. 発表標題 Reaction-diffusion models for Min oscillations: wave instability in a confined space
3. 学会等名 Complex motile matter - from single agents to collective behaviors (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Natsuhiko Yoshinaga
2. 発表標題 Estimation of continuum and discrete models for quasicrystal formation
3. 学会等名 the 15th International Conference on Quasicrystals (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Uyen Tu Lieu and Natsuhiko Yoshinaga
2. 発表標題 Reinforcement learning for dynamic control of self-assembly of quasicrystals from patchy particles
3. 学会等名 APS March Meeting 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Uyen Tu Lieu and Natsuhiko Yoshinaga
2. 発表標題 Inverse design of two-dimensional dodecagonal quasicrystal structure by patchy particles
3. 学会等名 STATPHYS28 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Bappaditya Roy and Natsuhiko Yoshinaga
2. 発表標題 Learning hydrodynamic equations from microscopic Langevin simulations of self-propelled particles dynamics
3. 学会等名 STATPHYS28 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Uyen Tu Lieu and Natsuhiko Yoshinaga
2. 発表標題 Inverse Design of Two-dimensional Dodecagonal Quasicrystal Structure by Patchy Particles
3. 学会等名 ISMC2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Bappaditya Roy and Natsuhiko Yoshinaga
2. 発表標題 Learning hydrodynamic equations from microscopic Langevin simulations of self-propelled particles dynamics
3. 学会等名 CCP2023 - 34th IUPAP Conference on Computational Physics (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

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/>

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
研究協力者	リュウ トウ ウェン (Lieu Tu Uyen) (00807042)	東北大学・材料科学高等研究所・特任助教 (11301)	
研究協力者	バツパディア ロイ (Bappadi tya Roy)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・産総研・東北大 数理 先端材料モデリング オープンイノベーション ラボラトリ・ 産総研特別研究員 (82626)	

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