

令和 2 年 7 月 1 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H03949

研究課題名(和文) 自己駆動系の集団運動に対する数理モデリングとその数理解析

研究課題名(英文) Mathematical modeling of collective motion of self-propelled systems and its analysis

研究代表者

長山 雅晴 (NAGAYAMA, MASA HARU)

北海道大学・電子科学研究所・教授

研究者番号：20314289

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：自己駆動系に対する数理モデリングを行い、数理モデルの数理解析を行った。この研究では、実験グループと一体となって自己駆動体が自ら振動する系について振動する仕組みを数理モデリングにより解き明かした。また、複数個の自己駆動体を水面に浮かべたときに生じる集合運動の仕組みについて、毛管現象によって生じるのではなく、水面近くでの水溶液中に含まれる化学物質の濃度勾配に生じることを明らかにした。また、紐状の自己駆動体間の相互作用や自己駆動体形状に依存した相互作用による運動について数理モデリングと理論解析によって、その仕組みを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自己駆動系と呼ばれる化学的または物理的環境に応答しながら駆動する無生物実験系は、生物の群れの運動や細胞運動等の生命現象を理論的に理解する道具として重要な系となっている。この系に現れる現象の理論解析を行うためには、現象を記述する数理モデリングが必須である。この研究では、液滴の集団運動や自律的に周期運動する実験系に注目して、その運動を再現する数理モデリングを行い、その解析から運動が生じるメカニズムの解明を行った。

研究成果の概要(英文)：We carried out mathematical modeling of the self-propelled system and performed mathematical analysis of the mathematical model. In this research, together with the experimental group, we solved the mechanism of oscillation phenomena about the self-propelled material by mathematical modeling. Moreover, it was clarified that the mechanism of collective motion that occurs when multiple self-propelled materials float on the water is not caused by the capillarity phenomenon but is caused by the concentration gradient of the chemical substances contained in the aqueous solution near the water surface. In addition, we have clarified the mechanism of the interaction motion between the string-shaped self-propelled materials and the shape-dependent interaction motion between the self-propelled materials by mathematical modeling and theoretical analysis.

研究分野：応用数学

キーワード：数理モデリング 数値シミュレーション 分機解析 集団運動 自己組織化

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、あたかも生物のように化学的または物理的環境に応答しながら多彩な運動をするアクティブマターの実験および理論研究が注目されており、Vicsek (Phys.Rev.Lett.75,1226-1229(1995)) の粒子モデルの提案以来、非線形化学の分野で盛んに研究されている。そして、多くの実験系が報告されており、それに対応する形で数理モデリング、数理解析も多く行われている。しかしながら、研究が発展していくにしたがって、多くの未解決問題が生まれてきた。例えば、水面を滑走する樟脳粒を小さな領域に閉じ込めると、場の樟脳膜濃度と粒の運動が結合して、時間周期的な振動運動が出現すると報告されている (2015 年, J. Phys. Soc. Jpn, 84, 034802) が、この興味深い現象の機構は未解明のままである。また、化学反応と結合することによって新しい運動も示された。サルチル酸ブチル液滴を界面活性剤水溶液に浮かべたところ、界面活性剤水溶液濃度に依存して、停止 小さい振幅の往復運動 セルの壁を介した往復運動の3つの運動分岐が生じるが、その運動メカニズムは未解明である。さらに、このような液滴を複数個浮かべると、大きな液滴クラスターを形成することが知られているが、その形成プロセスも未解明となっている。また、近年になって自己駆動体運動の形状依存性について数値実験が行われるようになった。今後の自己駆動系を用いた運動制御の確立に大きく寄与すると考えられることから、形状に依存した運動の数理的メカニズムを数理科学的に明らかにすることは社会還元への応用に大きく寄与することになる。

2. 研究の目的

(1) 非生命自己駆動系に現れる運動を記述する数理モデリングを行い、数理解析と実験解析の相補的研究によって運動メカニズムを理論的に解明すること、および個別の現象を含んだより一般的な普遍性を持つ数理モデルの構築を目指す。これにより自己駆動体運動の標準モデルを完成させる。

(2) 数理解析と実験解析の相補的研究によって、反応拡散場における自己駆動体の集団運動の発現機構およびそのパターン形成のメカニズムを解明することである。

3. 研究の方法

この研究では数理解析グループと実験計測グループの相補的研究体制を作り、以下のよう
に研究を進めていく。

(1) 数理解析グループは、自己駆動系に見られる現象を再現するための数理モデリングを行う。数理モデルを構築するために必要となる仮定を明らかにし、実験計測グループとともに仮定の真偽を明らかにする。数理モデルから数値計算によって実験結果を定性的に再現すると同時にそのメカニズムを明らかにし、実験計測によるメカニズムの検証を行う。さらに、数理モデルに対する計算機援用解析、数値分岐解析あるいは数学解析を行い、数学的に現象再現の十分条件を明らかにする。

(2) 実験計測グループは、自己駆動系の実験系として、界面活性剤の1つである樟脳の粉末を固めたもの、あるいはサルチル酸ブチル等の界面活性作用を持つ液滴を用いて実験を行う。実験結果はカメラで動画撮影を行い、動画を用いた解析から運動の特徴を取り出す。数理モデリングの結果を得るための仮定の真偽について実験を行い、その結果を数理解析グループに提供し、数理モデリングの基盤とする。また、数理解析グループから示唆された結果について実験による検証を行う。

4. 研究成果

(1) 自己駆動体運動の実験、数理モデリングと数理解析
紐状の自己駆動体運動について実験が行われ、2つの紐の相互作用運動が明らかになった。この運動を理解するために、反応拡散-粒子運動モデルを拡張した反応拡散-弾性体運動モ

デルを構築し、2つの自己駆動紐の運動を数値計算によって再現することに成功した (2017, *Computer Methods in Materials Science* 17(2), 111-121)。また、自己駆動体の集団運動の一つに渋滞現象が上げられるが、その渋滞現象について、数理モデルに対する中心多様体縮約によって複数個の自己駆動体運動を記述する常微分方程式系を導出し、その常微分方程式系を解析した。計算機援用解析から渋滞現象が一樣運動からの Hopf 分岐によって現れることを示した。さらに、自己駆動体の渋滞現象の特徴である渋滞波の前進現象の再現に成功した (2019, PRE 99, 062208)。そして、自己駆動体の水深依存性のメカニズムを解析するために、流れの影響を考慮した数理モデルも構築した。数理モデルの数値計算は2次元水面での水深依存実験の結果と定性的に一致するが、1次元水路に見られる水深依存性の結果とは逆の結果となっていた。その原因は1次元水路では側壁の影響を強く受けたためではないか考えられる。これにより、水深に依存した水面上での運動を実験・理論の両面から理解するためには境界付近の流れの影響を極力排除した系を考察する必要性が示唆された。

(2) 数理モデルの計算機援用分岐解析ソフトの開発

統一した自走粒子運動の数理モデルを解析するための、反応拡散-粒子モデルに対する数値分岐計算ソフトの開発をおこなった。この計算ソフトは非常に強力であり、1粒子モデルの解析においてもこれまでに知られていなかった分岐現象を発見することに成功した。さらに、2粒子モデルに見られる不規則運動が、周期倍分岐現象から生じる場合と周期解のトラス分岐から生じる場合があることを示した。

(3) 数理モデルに対する数学解析

自己駆動粒子の並進運動を記述する反応拡散-粒子モデルに対して、1次元全空間における解の一意存在を証明した。1次元全空間での2粒子運動について2粒子の距離を一定に保ったまま並進運動する解 (bimodal 解) の存在条件・非存在条件を明らかにした。さらに、周期境界条件下での2粒子運動について非対称回転運動解の存在・非存在の条件を示すことができた。これらの結果から、bimodal 解や非対称な回転運動が存在するためには、駆動力となる表面張力関数の界面活性物質濃度依存性について、上に凸となる部分が必要であることが明らかになった。この結果は、数理モデリングの可否を判断する非常に明確な結果となっている。これらの結果は現在論文投稿中である。さらに、空間2次元有界領域における解の存在定理や、樟脳分子供給項が関数で記述される場合について解の存在証明を行っている。

(4) 自己駆動体の形状依存運動に対する実験解析と理論解析

円対称ではない形状の樟脳粒の運動に関して、数理モデルを構築し、中心多様体縮約によって位置と特徴的な角度の時間発展に関する常微分方程式を導いた。また、そのような樟脳粒2つが相互作用する系の時間発展に関して議論した。濾紙に樟脳を付着させたものを成型して中心に穴があいた楕円形を作り、軸に通して水面に浮かべることにより重心が動かない実験系を構築した。その結果、単独では静止する条件の楕円形の樟脳粒子を2つ相互作用させたときに、長軸が2つの楕円形の中心を結ぶ直線に直交する向きに配向することを明らかにした。この実験結果は中心多様体集約で得られる常微分方程式の解析結果および元の数理モデルの数値計算結果と一致している (2018, *Physica D*, 366, 10-26)。さらに、円対称ではない形状の樟脳粒の運動に関して、円からの形状のずれを摂動的に取り扱い、粒子にはたらく力やトルクを計算することから、粒子の形状に依存して運動の方向が選択されることを示した。特に、円形から3次モードの形状のずれがある場合には、サイズが小さい場合には角の向きに、サイズが大きい場合には辺の向きに運動することを示した (2020, arxiv:2001.08019)。また、2次元の円形領域に閉じ込められた円形の樟脳粒は、抵抗係数をパラメータとして変化させると、抵抗係数が高いときには中心で静止する状態から、自発的に運動する状態へと転移する。その際、対称性から考慮すると、直径上を往復運動する場合と円運動する場合が予想される。そこで、樟脳分子濃度の時間発展と樟脳粒の運動についての発展方程式を考え、

常微分方程式に縮約することで円形領域の中心のまわりを回転運動することを見出した。実験および数値計算でも円形領域に閉じ込められた樟脳粒は円形領域の中心のまわりを回転運動するということが明らかにし、理論との整合性を確かめた (2019, PRE, 99, 022211)。

(5) サリチル酸ブチル液滴の自励振動現象に対する数理解析

サリチル酸ブチル液滴が界面活性剤水溶液濃度に依存して、容器の大きさに依存することなく、「停止 自励振動 大振幅往復運動」と変化する現象に対して、反応拡散方程式と運動方程式からなる数理モデルを構築した。その結果、水面近傍での界面活性剤濃度分布が壁のような働きをすることで往復運動すること解明した (2017, Soft Matter, 13, 3422-3430)。さらに、「自励振動 大きな振幅の往復運動」は周期解から並進運動への分岐があることまでは数値的に示すことができた。また酸塩基反応により、連続運動と振動運動間で分岐が生じることを実験に見出し、数理モデルから理論的に考察した (2019, Self-organized motion, RSC e-book)。

(6) サリチル酸エステル液滴の集団運動の数理解析と実験解析

単独で減衰振動するような液滴の集団運動の結果として表れる集合 (クラスター) 現象のメカニズムを明らかにするために、実験と数理モデリングの相補的研究を遂行した。液滴の集合現象の数理解析のために 1 次元的な集合運動に焦点を絞り、円環領域での実験を行った。その結果、液滴群は 1 つの集団になって停止することが明らかになった。集団運動のメカニズムを明らかにするために(5) で用いた数理モデルを拡張する形で数理モデルを構築し、数値計算によって集団形成の再現を行った。その結果、液滴の集団化は、まず液滴が数個の液滴クラスターを作って停止し、液滴クラスター間に形成される気水界面近傍での界面活性剤濃度のプロファイルの非対称により、小さい液滴クラスターがより大きな液滴クラスター側に移動して、より大きな液滴クラスターを形成することがわかった。これを繰り返すことで最終的に 1 つの液滴クラスターを形成することが示唆された。この結果は現在論文としてまとめている。

(7) 水面面積依存による運動変化の解析

水相の表面積を連続的に変化させることで、樟脳粒が連続運動・振動運動・停止という運動モードの分岐現象を起こすことを明らかにした。これにより、従来の多体系と比較して系を単純化することに成功した。この単体の樟脳粒の運動モードの分岐現象に対して、数理モデルを構築し、実験結果を説明することに成功した (2019 年, J. Phys. Soc. Jpn., 88, 093002)。ここでは従来の数理モデルにバルク相の効果を加えたモデルを提唱し、それを 2 変数常微分方程式に縮約することで、実験で観察された運動モードの分岐現象を再現・説明することに成功した。

(8) 油中水滴の自発運動に対する実験解析

界面活性剤の化学反応に起因して、油中水滴が自発的に運動する現象がある。この自発的な運動は、界面活性剤の化学反応によって油水界面に張力勾配が生まれるが原因で起こる。このような液滴運動を誘発する化学系における、界面張力ダイナミクスおよび反応生成物の分子構造を明らかにした。具体的には、Wilhelmy 法で界面張力の時間変化を測定し、数理モデルの結果と対比させることで、生成物・反応物の脱離速度や界面化学反応の速度などの物理化学定数を定量的に見積もることに成功した (2019, Langmuir, 35, 11601)。これらのデータを元にして、液滴の自発的な運動が誘起される機構を説明する汎用的な数理モデルの構築を今後行っていく予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計28件（うち査読付論文 28件 / うち国際共著 10件 / うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Nakata Satoshi, Kayahara Katsuhiko, Kuze Masakazu, Ginder Elliott, Nagayama Masaharu, Nishimori Hiraku	4. 巻 14
2. 論文標題 Synchronization of self-propelled soft pendulums	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Soft Matter	6. 最初と最後の頁 3791 ~ 3798
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C8SM00517F	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 Tanaka Yoshitaro, Yasugi Tetsuo, Nagayama Masaharu, Sato Makoto, Ei Shin-Ichiro	4. 巻 8
2. 論文標題 JAK/STAT guarantees robust neural stem cell differentiation by shutting off biological noise	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 12484
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-018-30929-1	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 Kumamoto Junichi, Nakanishi Shinobu, Makita Mio, Uesaka Masaaki, Yasugahira Yusuke, Kobayashi Yasuaki, Nagayama Masaharu, Denda Sumiko, Denda Mitsuhiro	4. 巻 8
2. 論文標題 Mathematical-model-guided development of full-thickness epidermal equivalent	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 17999
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-018-36647-y	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 Kobayashi Yasuaki, Yasugahira Yusuke, Kitahata Hiroyuki, Watanabe Mika, Natsuga Ken, Nagayama Masaharu	4. 巻 4
2. 論文標題 Interplay between epidermal stem cell dynamics and dermal deformation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 npj Computational Materials	6. 最初と最後の頁 45
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41524-018-0101-z	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 Amemiya Takashi, Shibata Kenichi, Du Yichen, Nakata Satoshi, Yamaguchi Tomohiko	4. 巻 29
2. 論文標題 Modeling studies of heterogeneities in glycolytic oscillations in HeLa cervical cancer cells	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science	6. 最初と最後の頁 033132 ~ 033132
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5087216	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 Koyano Yuki, Kitahata Hiroyuki, Gryciuk Marian, Akulich Nadejda, Gorecka Agnieszka, Malecki Maciej, Gorecki Jerzy	4. 巻 29
2. 論文標題 Bifurcation in the angular velocity of a circular disk propelled by symmetrically distributed camphor pills	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science	6. 最初と最後の頁 013125 ~ 013125
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5061027	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 Koyano Yuki, Suematsu Nobuhiko J., Kitahata Hiroyuki	4. 巻 99
2. 論文標題 Rotational motion of a camphor disk in a circular region	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 022211/1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.99.022211	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 Suematsu Nobuhiko J., Nakata Satoshi	4. 巻 24
2. 論文標題 Evolution of Self-Propelled Objects: From the Viewpoint of Nonlinear Science	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Chemistry - A European Journal	6. 最初と最後の頁 6308 ~ 6324
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/chem.201705171	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 Guo Jong-Shenq, Nakamura Ken-Ichi, Ogiwara Toshiko, Wu Chin-Chin	4. 巻 472
2. 論文標題 Stability and uniqueness of traveling waves for a discrete bistable 3-species competition system	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Mathematical Analysis and Applications	6. 最初と最後の頁 1534 ~ 1550
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jmaa.2018.12.007	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 Cejkova Jitka, Schwarzenberger Karin, Eckert Kerstin, Tanaka Shinpei	4. 巻 566
2. 論文標題 Dancing performance of organic droplets in aqueous surfactant solutions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects	6. 最初と最後の頁 141 ~ 147
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.colsurfa.2019.01.027	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 Ei Shin-Ichiro, Kitahata Hiroyuki, Koyano Yuki, Nagayama Masaharu	4. 巻 366
2. 論文標題 Interaction of non-radially symmetric camphor particles	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physica D	6. 最初と最後の頁 10 ~ 26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physd.2017.11.004	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 E. Ginder, T. Minomo, M. Nagayama, S. Nakata and H. Yamamoto	4. 巻 17
2. 論文標題 Traveling pulse solutions in a point mass model of diffusing particles	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Computer Methods in Materials Science	6. 最初と最後の頁 111 ~ 121
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 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 Y. Kobayasih, H. Kitahata and M. Nagayama	4. 巻 96
2. 論文標題 Sustained dynamics of a locally excitable system with nonlocal interactions	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 22213
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevE.96.022213	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 M. Watanabe, K. Natsuga, W. Nishie, Y. Kobayashi, G. Donati, S. Suzuki, Y. Fujimura, T. Tsukiyama, H. Ujiie, S. Shinkuma, H. Nakamura, M. Murakami, M. Ozaki, M. Nagayama, F. M Watt, H. Shimizu	4. 巻 6
2. 論文標題 Type XVII collagen coordinates proliferation in the interfollicular epidermis	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 eLife	6. 最初と最後の頁 e26635
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7554/eLife.26635	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 該当する

1. 著者名 Satoh Yusuke, Sogabe Yoshimi, Kayahara Katsuhiko, Tanaka Shinpei, Nagayama Masaharu, Nakata Satoshi	4. 巻 13
2. 論文標題 Self-inverted reciprocation of an oil droplet on a surfactant solution	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Soft Matter	6. 最初と最後の頁 3422 ~ 3430
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/c7sm00252a	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 K. Nishi, S. Suzuki, K. Kayahara, M. Kuze, H. Kitahata, S. Nakata, Y. Nishiura	4. 巻 95
2. 論文標題 Achilles' heel of a traveling pulse subject to a local external stimulus	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 062209-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.95.062209	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 Yuki Koyano, Marian Gryciuk, Paulina Skrobanska, Maciej Malecki, Yutaka Sumino, Hiroyuki Kitahata, and Jerzy Gorecki	4. 巻 96
2. 論文標題 Relationship between the size of camphor driven rotor and its angular velocity	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 012609/1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.96.012609	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 Gorecki Jerzy, Kitahata Hiroyuki, Suematsu Nobuhiko J., Koyano Yuki, Skrobanska Paulina, Gryciuk Marian, Malecki Maciej, Tanabe Takahiro, Yamamoto Hiroya, Nakata Satoshi	4. 巻 19
2. 論文標題 Unidirectional motion of a camphor disk on water forced by interactions between surface camphor concentration and dynamically changing boundaries	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Chemistry Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 18767 ~ 18772
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/c7cp03252h	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 該当する

1. 著者名 Nakata Satoshi, Kayahara Katsuhiko, Yamamoto Hiroya, Skrobanska Paulina, Gorecki Jerzy, Awazu Akinori, Nishimori Hiraku, Kitahata Hiroyuki	4. 巻 122
2. 論文標題 Reciprocating Motion of a Self-Propelled Rotor Induced by Forced Halt and Release Operations	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 3482 ~ 3487
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.7b12089	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 Harold Fellermann, Shinpei Tanaka, and Steen Rasmussen	4. 巻 96
2. 論文標題 Sequence selection by dynamical symmetry breaking in an autocatalytic binary polymer model	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Phys. Rev. E	6. 最初と最後の頁 62407
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.96.062407.	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 Shinpei Tanaka, Satoshi Nakata and Takeshi Kano	4. 巻 86
2. 論文標題 Dynamic ordering in a swarm of floating droplets driven by solutal Marangoni effect	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 J. Phys. Soc. Jpn.	6. 最初と最後の頁 101004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.86.101004	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 Y. Koyano, T. Sakurai and H. Kitahata	4. 巻 94
2. 論文標題 Oscillatory motion of a camphor grain in a one-dimensional finite region	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Phys. Rev. E	6. 最初と最後の頁 42215
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.94.042215	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 Y. Matsuda, N. J. Suematsu, H. Kitahata, Y. S. Ikura and S. Nakata	4. 巻 654
2. 論文標題 Acceleration or deceleration of self-motion by the Marangoni effect	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Chem. Phys. Lett.	6. 最初と最後の頁 92-96
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cpllett.2016.05.008	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 S. Nakata, H. Yamamoto, Y. Koyano, O. Yamanaka, Y. Sumino, N. J. Suematsu, H. Kitahata, P. Skrobanska, J. Gorecki	4. 巻 120
2. 論文標題 Selection of rotation direction for a camphor disk resulting from a chiral asymmetry of a water chamber	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry B	6. 最初と最後の頁 1966-9172
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.6b05427	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 N. J. Suematsu, Y. Mori, T. Amemiya, S. Nakata	4. 巻 7
2. 論文標題 Oscillation of speed of a self-propelled Belousov - Zhabotinsky droplet	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 3424-3428
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcllett.6b01539	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 K. Ito, T. Ezaki, S. Suzuki, R. Kobayashi, Y. Hara, S. Nakata	4. 巻 120
2. 論文標題 Synchronization of two self-oscillating gels based on chemo-mechanical coupling	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry B	6. 最初と最後の頁 2977-2983
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpccb.6b00873	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 小保正朗	4. 巻 4
2. 論文標題 双曲型自由境界問題の数理解析及び数値解析 (付着・剥離・衝突の数理解析)	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 数学 (岩波書店 日本数学会編集)	6. 最初と最後の頁 68
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 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 T. Ogawa, E. Shoji, N. J. Suematsu, H. Nishimori, S. Izumi, A. Awazu and M. Ima	4. 巻 11
2. 論文標題 The Flux of Euglena gracilis Cells Depends on the Gradient of Light Intensity	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 PLoS ONE	6. 最初と最後の頁 e0168114
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1371/journal.pone.0168114	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44件（うち招待講演 25件 / うち国際学会 20件）

1. 発表者名 長山雅晴
2. 発表標題 双安定反応拡散系の分岐数値計算
3. 学会等名 反応拡散系のパターンダイナミクス
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長山雅晴
2. 発表標題 自己駆動体運動の数理解析
3. 学会等名 研究集会「反応拡散系と実験の融合」（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡本守, 長山雅晴
2. 発表標題 (non-)Existence of (a)symmetrically rotating solution for a mathematical model of self-propulsion
3. 学会等名 第20回北東数学解析研究会（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長山雅晴
2. 発表標題 Theoretical analysis for a mathematical model of a self-propelled motion
3. 学会等名 2018 China-Japan Workshop on Nonlinear Diffusion Problems（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上坂正晃, 長山雅晴
2. 発表標題 The well-posedness and its short-time asymptotics of the reaction-diffusion-particle model for the camphor motion in two dimension
3. 学会等名 2018 China-Japan Workshop on Nonlinear Diffusion Problems, Shanghai Normal University, (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長山雅晴
2. 発表標題 非線形現象の数値モデルを作ろう
3. 学会等名 日本数学会秋期総合分科会 (市民講演会) (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長山雅晴
2. 発表標題 Theoretical analysis for a mathematical model of a self-propelled motion
3. 学会等名 A3 Foresight Program The 5th Joint Workshop, Mathematics of Biology, Fluid Dynamics and Material Sciences (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長山雅晴
2. 発表標題 Theoretical analysis of a mathematical model for a self-propelled motion
3. 学会等名 The 12th AIMS Conference on Dynamical systems, Differential Equations and Applications (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 北畑裕之
2. 発表標題 Hydrodynamic Coupling between Active Matter and Pattern Formation
3. 学会等名 Gordon Research Conference: Oscillations and Dynamic Instabilities in Chemical Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 北畑裕之
2. 発表標題 Hydrodynamic collective effects of active proteins in biological systems
3. 学会等名 Workshop "Trends in Computational Molecular Biophysics" (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 末松 J. 信彦
2. 発表標題 数密度の増加に誘起されるしょうのう粒の振動運動
3. 学会等名 物理学会 2018年秋季大会(物性)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 末松 J. 信彦
2. 発表標題 非線形科学からの自己駆動物体
3. 学会等名 第69回 コロイドおよび界面化学討論会(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中村健一
2. 発表標題 Uniqueness and stability of monotone traveling waves for bistable lattice dynamical systems
3. 学会等名 2018 China-Japan Workshop on Nonlinear Diffusion Problems (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中村健一
2. 発表標題 Asymptotic Stability of Traveling Waves for Bistable Lattice Dynamical Systems of Cooperation Type
3. 学会等名 The 12th AIMS Conference on Dynamical Systems, Differential Equations and Applications (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中村健一
2. 発表標題 Effect of Diffusion Type on the Propagation Speed of Traveling Fronts in Periodic Environments
3. 学会等名 The 12th AIMS Conference on Dynamical Systems, Differential Equations and Applications (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小俣正朗
2. 発表標題 Free boundary problems of hyperbolic type with a focus on the free boundary conditions
3. 学会等名 The 11th Mathematical Society of Japan (MSJ) Seasonal Institute (SI)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長山雅晴
2. 発表標題 自走粒子運動の数理モデル
3. 学会等名 2018 軽井沢グラフと解析研究集会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長山雅晴
2. 発表標題 自己駆動粒子の集団運動に対する数理解析
3. 学会等名 函館応用数理解析セミナー（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岡本守，長山雅晴
2. 発表標題 対流の効果を含む界面活性剤系自走粒子の自律運動に関する数理モデル
3. 学会等名 応用数学合同研究集会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yusuke Satoh, Masaharu Nagayama
2. 発表標題 Self-inverted Reciprocation of an Oil Droplet on a Surfactant Solution
3. 学会等名 The 18th RIES-Hokudai International Symposium “Kyoku”（国際学会）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Mamoru Okamoto, Masaharu Nagayama
2. 発表標題 Mathematical model including fluid's effect of camphor disk's self-motion
3. 学会等名 The 18th RIES-Hokudai International Symposium "Kyoku" (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masaharu Nagayama
2. 発表標題 Mathematical analysis of the collective motion of camphor disks
3. 学会等名 Free Boundary Problems and Nonlinear PDEs (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 長山雅晴
2. 発表標題 自己駆動系粒子運動の数理解析
3. 学会等名 千葉大学非線形科学セミナー (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 長山雅晴
2. 発表標題 自走粒子系の集団運動に対する数理解析
3. 学会等名 岡山大学解析セミナー
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hiroyuki Kitahata
2. 発表標題 Hydrodynamic coupling between active matters and pattern formation
3. 学会等名 International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Satoshi Nakata
2. 発表標題 Self-organization, Self-propulsion, Compartmentalization and their application
3. 学会等名 XXXVII Dynamics Days Europe (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Nobuhiko J. Suematsu
2. 発表標題 Self-Propelled Objects from Viewpoint of Nonlinear Science
3. 学会等名 Active Matter 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Nobuhiko J. Suematsu
2. 発表標題 Nonlinear Behavior of a Self-propelled Droplet Coupling with the Belousov-Zhabotinsky Reaction
3. 学会等名 XXXVII Dynamics Days Europe (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 田中晋平
2. 発表標題 自己駆動有機溶媒液滴の集団運動: 拡散モデルによる検討
3. 学会等名 物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Shinpei Tanaka
2. 発表標題 Collective dynamic orderings of oil droplet surfers
3. 学会等名 SWARM2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masaharu Nagayama
2. 発表標題 Mathematical modeling and analysis of the self-propelled disk and its collective motions
3. 学会等名 International Conference on " Reaction-diffusion system, theory and applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 長山雅晴
2. 発表標題 自励往復運動する液滴の数理モデル
3. 学会等名 非線形現象の数値シミュレーションと解析2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 長山雅晴
2. 発表標題 樟脳円盤の集団運動と反応拡散系
3. 学会等名 複雑系数理の新展開 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masaharu Nagayama
2. 発表標題 Mathematical analysis of the collective motion of camphor disks
3. 学会等名 International Workshop: Mathematics of Pattern Formation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Masaharu Nagayama
2. 発表標題 Chaotic traveling pulses in some reaction-diffusion system
3. 学会等名 The 11th AIMS Conference on Dynamical systems, Differential Equations and Applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Masaharu Nagayama
2. 発表標題 The collective motion of camphor papers in an annular water channel
3. 学会等名 International Workshop in Industrial Mathematics, Campinas University (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 田中晋平, 加納剛史
2. 発表標題 気液界面を自己駆動する液滴集団の動的秩序形成：非対称な相互作用モデルによる理解
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 田中晋平
2. 発表標題 気液界面を運動するサリチル酸液滴集団の動的秩序形成：一粒子振動と集団振動
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 北畑裕之, 小谷野由紀, 住野豊, Paulina Skrobanska, Jerzy Gorecki
2. 発表標題 自発的にカイラリティを破って動く自己駆動粒子
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hiroyuki Kitahata
2. 発表標題 Spontaneous Motion of a Droplet under Nonequilibrium Condition
3. 学会等名 17th RIES-Hokudai International Symposium on "柔" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Hiroyuki Kitahata, Tomohiro Sasaki, Nobuhiko J. Suematsu, Tatsunari Sakurai
2. 発表標題 Spontaneous recurrence of deposition and dissolution of a solid layer on a solution surface
3. 学会等名 Gordon Research Conferences on Oscillations and Dynamic Instabilities in Chemical Systems
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Satoshi Nakata
2. 発表標題 Spatio-temporal behaviors of self-propelled motors characteristically responsive to the environments
3. 学会等名 Gordon Research Conferences on Oscillations and Dynamic Instabilities in Chemical Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 末松 J. 信彦
2. 発表標題 自律運動の反応速度論的制御とその走化性への応用
3. 学会等名 日本化学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 末松 J. 信彦
2. 発表標題 自己駆動粒子の集団に現れる運動モード転移
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 S. Nakata and M. Nagayama	4. 発行年 2018年
2. 出版社 e-book of Royal Society of Chemistry	5. 総ページ数 371
3. 書名 Self-organized Motion: Physicochemical Design based on Nonlinear Dynamics (Chapter 1)	

1. 著者名 HJ. Kitahata, Y. Koyano, K. Iida and M. Nagayama	4. 発行年 2018年
2. 出版社 e-book of Royal Society of Chemistry	5. 総ページ数 317
3. 書名 Self-organized Motion: Physicochemical Design based on Nonlinear Dynamics (Chapter 2)	

〔産業財産権〕

〔その他〕

Presentation http://mmc01.es.hokudai.ac.jp/prof/presen Research work http://mmc01.es.hokudai.ac.jp/prof/research

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	小俣 正朗 (Omata Seiro) (20214223)	金沢大学・数物科学系・教授 (13301)	

6. 研究組織（つづき）

	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	北畑 裕之 (Kitahata Hiroyuki) (20378532)	千葉大学・大学院理学研究院・准教授 (12501)	
研究分担者	G i n d e r E l l i o t t (Elliott Ginder) (30648217)	明治大学・総合数理学部・専任准教授 (32682)	
研究分担者	中村 健一 (Nakamura Ken-Ichi) (40293120)	金沢大学・数物科学系・准教授 (13301)	
研究分担者	田中 晋平 (Tanaka Shinpei) (40379897)	広島大学・総合科学研究科・准教授 (15401)	
研究分担者	中田 聡 (Nakata Satoshi) (50217741)	広島大学・理学研究科・教授 (15401)	
研究分担者	末松 信彦 (Suematsu Nobuhiko) (80542274)	明治大学・総合数理学部・専任准教授 (32682)	