

令和 6 年 4 月 18 日現在

機関番号：33903

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K03775

研究課題名（和文）Swarm oscillatorモデルの解析による自己駆動粒子集団の理解

研究課題名（英文）Exploration of groups of self-driven particles in terms of the swarm oscillator model.

研究代表者

巖佐 正智（Iwasa, Masatomo）

愛知工業大学・工学部・准教授

研究者番号：20444375

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,900,000円

研究成果の概要（和文）：多様な構造を自発的に形成する粒子集団であるswarm oscillatorモデルを解析し、構造形成メカニズムの探究を行ってきた。結果、次のような成果が得られた。1) Swarm oscillatorモデルにおいては、内部自由度の存在が構造多様性をもたらしていることが数理的に裏付けられた。2) 粒子間相互作用が対称でも、適切に外的な散逸力がはたらく場合、有効相互作用は非対称になりうることを示された。3) 現実の細胞の運動と比較により、swarm oscillatorモデルが現実の細胞の運動メカニズムを備えていることも示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

内部自由度や非対称な相互作用は、生物学的（アクティブな）粒子に典型的な性質であり、これらの成果が、群れなど生物の集団において多様な集団的挙動が形成される理由を内包している可能性が示唆されたことになると考えられる。また、現実の細胞集団を理解する際、swarm oscillatorモデルはその簡便な数理モデルとして機能する可能性が高まったと考えられる。

研究成果の概要（英文）：Swarm oscillator model, a mathematical model of a many-particle system exhibiting various macroscopic pattern formation, was analyzed to investigate the mechanism underlying the self-organization. The result was such that 1) it was mathematically shown that the internal degree of freedom of the particles leads to the diversity of the patterns, 2) it is also shown that, even when the direct interaction between particles is symmetric, the effective interaction can be asymmetric when there is an appropriate external dissipative force, and 3) the comparison of the model with the real cell revealed that the mechanism of the motion of the real cell is well described by that of the model.

研究分野：理論物理学

キーワード：自己組織化 非対称散逸系 自己駆動多粒子系 アクティブマター

## 1. 研究開始当初の背景

単細胞から動物まで、自ら動く(自己駆動する)生物は自然界に広くみられ、その多くがしばしば群れを形成する。群れは生物の生存を左右する重要な機能であり、環境に応じた最適な集団形態をしばしば示すとともに、外敵の接近のような環境の変化に対しても適切に形態変化して適応する柔軟な振る舞いをみせる。このメカニズムの理解のため、生物個体を自己駆動する粒子とみなし、相互作用する自己駆動粒子の集団で群れをモデル化して、理論物理学的な対象として理解が試みられてきた。各種の群れに対して自己駆動粒子集団による数理モデルが提案され、理解が進められてきており、例えば、魚や動物、歩行者集団、車の流れなどに対する数理モデルが提案されるなど、精力的に研究が進められてきた。

## 2. 研究の目的

自己駆動する粒子集団による形態形成のメカニズムを理解するため、本研究課題では swarm oscillator モデルに注目し、研究を行った。Swarm oscillator モデルは次のような特徴をもつ。まず、各粒子は走化性(化学物質の濃い方に動く性質)を有する粒子であり、化学物質の媒介に起源をもつ粒子間相互作用が想定されている。このような性質をもつ粒子の長時間スケールの挙動を取り出したものが、swarm oscillator モデルである。過去の研究により、swarm oscillator モデルがもつ4つのパラメータを変化させると、多様な集団形態が自発的に形成されることが判っている。また、この多様性は粒子間相互作用の多様性によりもたらされることも判明している。すなわち、これらのパラメータ値の変更は、粒子間の引力と斥力の転換や、相互作用の非対称性(作用・反作用の法則からの破れ)の度合の変更を意味する。ゆえに、swarm oscillator モデルを詳細に調べることで、種の違いを超えて存在する群れの普遍的な性質を抽出できる可能性が高いと考え、このモデルに注目して研究を行った。また、数理面からは、swarm oscillator モデルは解析のしやすさに特徴がある。モデル方程式の関数形がシンプルであり、手計算による解析が容易であるため、解析によって、ミクロな性質(粒子間相互作用)からマクロな性質(集団現象)が引き起こされるメカニズムを直接的に明示することが可能である。これらの特徴をもつため、swarm oscillator モデルを解析することにより、自己駆動粒子集団の形態形成メカニズムの発見ができるのではないかと考えた。本研究の目的は、ある特定の生物集団の理解にあるのではなく、そもそも多様な集団の運動や形態は何によって定まっているのかを明らかにすることであり、このことにより、群れを支配する一般的な原理や法則の発見につながることを期待した。一方、一般的に得られた帰結を現実に敷衍することで、細胞集団をはじめとする様々な現実の群れを理解するための、新たな知見の発見につながると期待した。

### 3. 研究の方法

先述のように，swarm oscillator モデルはモデル方程式の関数がシンプルであり，手計算による解析が容易であると共に，単純化・一般化しやすい利点があるため，主に解析的計算により研究を行った．モデルは常微分方程式で与えられており，力学系の解析による動力的（決定論的）アプローチを採った．出現する形態形成の傾向を把握するために数値シミュレーションを援用したが，一般的な結論の導出は解析的計算により行った．

### 4. 研究成果

まず，形態形成における内部自由度の果たす役割について探究を行った．Swarm oscillator モデルの特徴の一つとして，粒子が内部自由度をもつ（粒子の状態によって粒子間相互作用が変化するというものがある．そのため，内部自由度が秩序構造の多様性をもたらすのに重要な役割を果たしていると予想されるが，そのことを数理的に裏付ける研究を行った．つまり，swarm oscillator モデルの粒子間相互作用と本質的に同一ながら単純化した数理モデルを考え，粒子に内部自由度が有るモデルと無いモデルを共に解析し，出現する秩序構造にどのような違いが現れるかを検討した．結果として，内部自由度が有るモデルにおいては，無いモデルに比べ，多様な構造が出現することが示された．例えば，平面的に広がりのある構造は両方のモデルにおいて出現する一方で，直線的に広がりのある構造は，内部自由度の有るモデルでしか生じないことが理解された．内部自由度は生物が一般的にもつ特性であるため，生物の群れが多様な集団挙動を示すことができる本質的な理由の一つが，本成果により示されている可能性がある．

次に，相互作用の非対称性に関する探究を行った．Swarm oscillator モデルが多様な形態を形成する背景には，粒子間相互作用が非対称になりうるという性質がある．その点で，どのような性質を備えた粒子であれば，粒子間相互作用が非対称になりうるかを明らかにすることは重要な課題であった．研究の結果，粒子間の直接的な相互作用が対称であっても，個々の粒子に適当な散逸力が外力としてはたらく場合，粒子間に有効的にはたらく相互作用は非対称になりうることを示した．さらに，そのような系を具体的に構成することにより，現実の世界で個体間に非対称な相互作用が生じることが確認され，その大きさも定量的に評価された．つまり，非対称な相互作用が比較的単純なメカニズムで生じることが明らかとなったため，この成果も，生物の群れにおいて，多様な集団挙動が広くみられる理由の一つである可能性が考えられる．

一方で，swarm oscillator モデルと現実との類似性について検討を加える研究も行った．Swarm oscillator モデルは，走化性細胞のモデルと考えられてきたが，現実をどの程度よく記述しているモデルであるかは明らかではなかった．本研究では，走化性細胞の数理モデルを立て，その細胞が誘引物質に対してどのように運動するかを解析した．その結果，走化性細胞の運動特性はswarm oscillator モデルの粒子と同じ運動特性を備えることが明らかとなった．この研究に付随して，モデル生物として知られるキイロタマホコリカビの細胞の慣性が定量的に見積もられた．今後は，このようなモデル粒子の集団も，現実の細胞集団と同じ挙動を示すかどうかを検討することが課題として挙げられる．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Masatomo Iwasa	4. 巻 2
2. 論文標題 Minimal force to move the heavier opponent: Investigation of sumo game	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Scientific Journal of Sport and Performance	6. 最初と最後の頁 151-164
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.55860/HSNY2515	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 Ishiwata Ryosuke, Iwasa Masatomo	4. 巻 11
2. 論文標題 Cellular inertia	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	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） 10.1038/s41598-021-02384-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 Masatomo Iwasa	4. 巻 102
2. 論文標題 Role of the internal degree of freedom of particles in cluster formation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 62202
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevE.102.062202	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 -

〔学会発表〕 計0件

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----

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