

Formation of Solitary Waves in Collective Motion of Self-Propelled Particles

石橋, 和也

<https://hdl.handle.net/2324/4784655>

出版情報 : Kyushu University, 2021, 博士 (理学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

氏 名 : 石橋 和也

論 文 名 : Formation of Solitary Waves in Collective Motion of Self-Propelled Particles

(自己駆動粒子の集団運動における孤立波の形成)

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 旨

魚の群泳、鳥の集団飛行、細菌のコロニーといった個が集団となって振る舞う様は自然界のいたる所で目にする事ができる。魚や鳥といった自律的に動くものを自己駆動粒子と呼び、その集団での振る舞いは理論・実験の両面で研究されている。生き物だけでなく、分子モーターや、半球面が異なる素材でコーティングされたヤヌス粒子といった非生物も自己駆動粒子として扱い、研究の対象になっている。実験では、大きさの異なる自己駆動粒子がそれぞれのスケールで協調した運動を示しており、そのスケールに依らない共通の振る舞いについて数理モデルを用いて理解しようとする事は自然な流れである。しかし、粒子が無秩序に動く状態から協調して動く秩序のある状態への相転移は非平衡系のシステム内で起こるため複雑である。そこで、多数の粒子が運動する集団に平均場近似を導入して相転移のメカニズムについて調べた。特に、粒子が向きを揃えて運動するだけでなく、局所的に集合して運動する状態、孤立波状態の形成メカニズムについて調べた。

まず、クラマース方程式を使用した数理モデルを導入して粒子の時空間分布について調べる。確率密度を用いる事で粒子の個々の運動を調べる従来の手法より、揺らぎがないため相転移をはっきりと確認する事ができる。クラマース方程式に、粒子の位置と速度の確率密度を用いた場合、粒子の運動方向と位置の確率密度を用いた場合の両方で、粒子が無秩序に運動する無秩序状態、向きを揃えて運動する秩序状態、局所的に集まり向きを揃えて運動する孤立波状態の3つの状態間の相転移が確認できた。さらに、速度を2つしか持たず、移流項、拡散項、粒子が確率的に向きを変える項を加えた単純な数理モデルを導入して、孤立波の形成メカニズムについて考える。粒子が移動する移流項がこの孤立波の形成に重要な役割を果たす事がわかった。

次に、孤立波が急激に進行方向を変えて、反転を繰り返す現象について調べる。この現象は先行研究の1次元系のアクティブイジングモデルで確認されているが、その発生メカニズムは詳しくわかっていない。そこで、この波の進行方向を急激に変更し続けながら孤立波が維持される状態を調べるために、新たにイジング型ヴィチェックモデルを導入する。このモデルの粒子は左右の格子点上にのみ移動でき、格子点上に複数の粒子が滞在できる。さらに、次の時刻でのある粒子の運動方向は、周囲の格子点上にある粒子の運動方向の局所的な多数決によって、確率的に決まる簡素なモデルである。このモデルで数値計算を行うと、方向転換によって維持される孤立波状態が1次元系、2次元系の両方で現れた。この孤立波の反転は、孤立波が十分なだけになり、逆向きの小さな振幅の波が、局所的な多数決で勝ち続け、孤立波の粒子が次々と運動方向を反転させる事によって起こる。つまり、この孤立波の形成には局所的な多数決のルールと箒の一扫で埃を一度に集める様な一扫過程が必要である。通常、粒子の分布が密になると付近の粒子の速度が低下し、疎密な領域が拡大する。先行研究では、この運動誘発相分離が孤立波の形成に関係している事が知られている。しかし、本研究のモデルでは速度の増減はなく、粒子の向きも粒子密度に依存せず決まる。本研究で、従来の運動誘発が無くても局所的な多数決と一扫過程によって孤立波が形成されることを明らかにした。