

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	市野 悠
論文題目	Nonequilibrium Dynamics of Deformable Self-Propelled Particles (変形可能な自己推進粒子系の非平衡ダイナミクス)		
(論文内容の要旨)			
化学エネルギーなどを利用して自己推進する粒子は非平衡系の非線形ダイナミクスを実現する対象としてこの15年以上、多くの研究が行われてきた。最近では Marangoni 効果による液滴の自発運動、メゾスコピック、ナノスコピックの Janus 粒子の並進、回転運動など材料科学との関連でも興味もたれている。さらに、生体細胞やバクテリアの運動を理解することとも関係する重要な研究テーマである。 純粋に学術的観点にたっても、自己推進粒子とそれらが相互作用する集団のダイナミクスは新しい力学系の問題であり、その集団運動は新たな非平衡秩序形成の問題をわれわれに提示している。Vicsk らの先駆的研究では、粒子の大きさは考えず、自分の進行方向が周りの平均と同じになる要請とそれを乱すランダム性を考慮し、粒子密度や乱雑性の強度を変化させたときに、無秩序な運動から隊列を組んで進行するような秩序ある集団運動にどのように転移するか、また、どのような集団運動が現れるかが主たる関心であった。 これらの先行研究に比べ、本学位論文の内容は次の特徴をもつ。その一つは粒子の大きさを考え、その形の変形を考慮することである。実際、上に述べた液滴は自発運動速度に依存して液滴が円から変形することが知られているし、また、生体細胞の移動では変形と重心運動がカップルしているのは明らかである。二つ目は粒子間に、配向の相互作用だけではなく、お互いの排除体積効果を取り入れるため斥力相互作用を導入したことである。これらを考慮した運動方程式を空間2次元で大規模数値シミュレーションを行い、秩序形成ダイナミクスやその崩壊ダイナミクスを研究した。また、粒子密度が高いところでの秩序崩壊ダイナミクスに対する平均場近似による理論解析を行った。 斥力相互作用の導入は剛体粒子系では、われわれと独立に国外のグループで、始まったばかりであり、変形可能な柔らかな粒子の集団運動の理論的研究は他では行われていない。			

(論文審査の結果の要旨)

自己推進粒子集団の大規模計算機シミュレーションを空間2次元で行った。円形粒子は速度とともに楕円型に変形する効果を入れてある。粒子間相互作用は楕円変形の向きをそろえる効果とともに粒子の距離の関数としてガウス型の斥力相互作用を取り入れた。また、従来型のモデルとの対比をみるため、粒子の運動方程式にノイズを加えてある。得られた主要な結果は以下の通りである。

(1) 希薄な極限から密度を増加させたとき、個々の粒子がバラバラに運動している状態からすべての粒子がそろって同じ方向に運動する秩序状態が発生する。また、この秩序状態は粒子密度を固定してノイズ強度を増加させると不安定化する。これらの性質は従来型のモデルと同じである。ただし、無秩序・秩序転移は不連続転移である。

(2) ノイズ強度を固定して、粒子密度をさらに大きくしていくと秩序状態が崩壊する。密度をゆっくり下げていくと秩序状態が回復するが大きなヒステリシスが生じる。

(3) 秩序状態が回復する過程で、しばしばある種の2相共存状態が出現する。特別な場合には、秩序あるバンド状の領域が無秩序状態の中を一定速度で伝搬する。この共存状態は計算機で調べた範囲では、過渡的に出現しているのではなく安定な定常状態である。

(4) 粒子密度を上げていったときの秩序状態の崩壊を平均場近似による解析を行い、サドル・ノード型の分岐で説明できることを示した。

(2)、(3)、(4)は本研究による独自の成果である。今後さらに解明すべき問題として、高密度領域での秩序状態の崩壊はガウス型相互作用特有の性質であるのか、あるいは、他の相互作用でも起こるのか、変形することはどのように影響しているのかなどがある。

このように、変形する粒子の集団自己推進ダイナミクスに関して完成する理論を作った訳ではないが、(3)で述べた共存は熱平衡系では決して存在しない非平衡特有のものであり、非平衡系の転移に対して熱平衡相転移のアナロジーが一般には成立しないことを表しており重要な成果である。

よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成24年12月28日論文内容とそれに関連した口頭試問を行った。その結果合格と認めた。

要旨公開可能日： 年 月 日以降