

論文の内容の要旨

論文題目

Collective dynamics of self-driven particles with attachment and detachment
(吸脱着機構を持つ自己駆動粒子系の集団動力学)

氏 名 一木 信吾

近年、あるルールや意思に従って自発的に動くことができる自己駆動粒子の集団動力学が盛んに研究されている。自然や社会に見られる多くの自己駆動粒子系は、任意の場所から自由に粒子が出入りできる仕組みを備えている。このような自己駆動粒子系は、粒子の複雑な出入りによって興味深い現象を示すことから、現実の系を理解する上で粒子の出入りに着目した研究を行うことは重要である。一方で、これらは平衡状態に達しないため、一般的に解析することが難しい。非平衡系の物理学は現在も発展途上の分野であることから、個別の系について理解を深め、学問として体系化を進めることは現代科学において重要な課題の一つである。そのため、自己駆動粒子系について数理模型を用いて現象を定式的に捉えることは、その振る舞いについて理解を得るだけでなく、非平衡系科学への発展にも貢献がある。

本論文では、自己駆動粒子系とそれに見られる現象を捉える上で性質の良い確率模型として知られている「非対称単純排他過程」を用いて、粒子の「吸脱着機構」に着目した研究を行った。既存の模型よりも複雑な吸脱着機構を考慮した数理模型を提案し、吸脱着機構と現象の関係について解析した。さらに、具体的な系に見られる集団現象について考察した。

第一章は序論として、本論文で対象としている粒子の出入りが自由な自己駆動粒子系の具体例を紹介した。また、このような系を表現する数理模型として非対称単純排他過程の基本的な内容について説明を行った。

第二章では、粒子が任意の場所で出入りできる仕組みを考慮した完全非対称単純排他過程に関する過去の先行研究を概観した。特に、本論文で提案した数理模型の原型となった当該模型について、周期系及び開放系それぞれの場合について解説した。

第三章では、前方の状態に依存する吸脱着機構を持つ周期系の完全非対称単純排他過程を提案した。これは車線変更を考慮した交通流を背景に提案された模型である。一般的に車線変更は、割り込みスペースとその前方の状況に応じて行われる。そこで第二章で紹介した原型模型をより現実的に拡張するため、粒子が吸脱着する際に進行方向前方の状況が考慮される吸脱着機構を考えた。そして、この数理模型に対して定常状態と緩和ダイナミクスについて平均場近似を用いた解析を行った。定常状態については、モンテカルロシミュレーションから得られた結果と比較検証することで、平均場近似から得られた明示的な表現によって精度良く説明できることがわかった。また、平均場近似を用いて得られた緩和ダイナミクスについては、モンテカルロシミュレーションから得られた緩和ダイナミクス及び厳密対角化を用いて得られた緩和時間の推定値を用いて比較検証した。この検証から平均場近似を用いて得られた緩和ダイナミクスの明示的な表現が精度の良い結果を与えていることがわかった。

第四章は、前後の状態に依存する吸脱着機構を持つ開放系の完全非対称単純排他過程を提案した。これは粒子が吸脱着する際に、前方のみならず後方の状態にも依存するよう拡張し、さらに開放境界にすることでより複雑な現象を捉えることを目的とした数理モデルである。近年、これと同様のモデルが提案されている。本論文で提案したモデルは、粒子の吸着レートと脱離レートが等しい場合において、各吸脱着レートが任意かつ独立に値を取ることができるよう先行研究のモデルを拡張している。そして平均場近似を用いることで定常状態における密度プロファイルを明示的に示した。また、第三章と同様に、モンテカルロシミュレーションの結果と比較することで精度良く現象が表現できることを確認した。さらに、衝撃波の位置が吸脱着レートに依存して変化することなど、原型モデルの結果を含んだ現象をより詳細に捉えることに成功した。

第五章では、具体的な観点から吸脱着機構を持つ自己駆動粒子系について研究した。特に、多くの金融商品取引所において用いられている連続ダブルオークションと呼ばれる取引メカニズムを取り上げた。オーダーブックと呼ばれる電子プラットフォームに見られる系は、注文を粒子としてみなすことで、投資家の意思によって粒子が自由に入出力できる自己駆動粒子系と考えることができる。ここではランダムな発注を考えた基礎モデル及び投資家のミクロな発注行動に過去の価格変動に追随するといった簡単なルールを設けることで投資家の集団行動を表現したモデルを提案した。そして吸脱着機構として表現されたミクロな投資家の集団行動がマクロな価格変動にどのような影響を及ぼすのか考察した。両モデルの比較結果から、投資家の集団行動を表現したモデルでは、一方向に連続して動いたときの価格幅の分布の裾が厚く広がりを持つことがわかった。つまり、過去の価格変動に追随する投資家の集団行動が、突発的に大きな価格変動が起こる一つの要因であることが捉えられた。また、粒子の吸脱着によって実際の系に見られる現象を表現できることから、吸脱着機構に着目した研究を行う重要性が理解できた。

最後に、第六章では、本論文のまとめと今後の展望について述べた。