

報告番号	※甲	第	号
------	----	---	---

主論文の要旨

論文題目 非対称散逸系における集団運動の安定性評価

氏名 石渡 龍輔

論文内容の要旨

古典的な物理学において相互作用とは、2つの物体が互いに力を及ぼしあうことである。相互作用は作用反作用の法則が成り立つため、物体 A が物体 B に力を及ぼすとき、物体 A は物体 B から力を受ける。また、作用反作用と関連して運動量保存の法則も成り立つので、物体は力をやりとりする相手なしに勝手に動きだすことはありえない。相互作用する典型的な物体の運動（連成振動子、希薄気体の運動など）は、ラグランジアンもしくはハミルトニアンとよばれるエネルギーの次元をもつ関数によってその性質を特徴付けることもできる。そして運動の安定性の解析については、ラグランジアンやハミルトニアンを用いた方法が数多く提案されている。

他方で、既存の物理学における物体とみなせない自動車、歩行者集団、魚、鳥、昆虫などの集団運動が、研究対象になっている。集団運動の構成要素は、様々な種類の個体なので、集団運動は「個体同士がお互いに影響を及ぼしながら運動する協同現象」とみなすことができる。ただし、個体同士の影響は相互作用と異なり、作用反作用や運動量保存の法則を満たさないものである。物理学において空間的な非対称性をもつ影響のことは、非対称相互作用とよばれる。非対称相互作用とエネルギー散逸を含む系が、非対称散逸系である。

非対称散逸系で表現される個体は、外力ではなく燃料などで自ら運動し、他者との関係で自ら運動を制御する自己駆動（自走）粒子である。自己駆動粒子の典型は、高速道路を走行する自動車であり、直前方の車両との車間に応じた加減速の制御が非対称相互作用に対応する。高速道路において自動車の車両数密度が臨界値をこえると渋滞（車両の高密度領域）が発生するようになる。このように非対称散逸系にみられる集団運動では、全体としての動力学的な性質が変化することが多い。

理学的な観点だけでなく、生体を模倣する応用面を考えた場合でも、生物の集団運動にみられる普遍的性質の理解は重要であろう。かといって、非対称散逸系を表現する運動方程式を考えればあい、ラグランジアンやハミルトニアンが存在しない場合が多い。そのため、物体の運動に用いることのできた数多くの手法が応用できないという困難がある。

本研究では、2次元空間中で運動する自己駆動粒子の集団運動を対象とし、様々な非対称散逸系の現象にも適用できる解析方法を考え、安定性の解析を行った。非対称散逸系のモデルとして、相互作用の非対称性に着目した2次元最適速度モデル（2次元OVモデル）を用いた。2次元OVモデルは進行方向に偏向した非対称相互作用によって運動を制御する多体のモデルである。

安定性の性質を調べるため、集団中の個体の配置と集団運動の安定性の関係の解明を行った。集団中の個体の配置は、集団運動の基本的性質のひとつであるため、観察やシミュレーションによる実験が数多く行われている。本研究では、2次元OVモデルの解析計算を行い、個体の配置と集団運動の安定性の関係を調査した。安定性の性質を調べるため、定常状態（一様流解）を元にした解析を行なった。2次元OVモデルの自己駆動粒子が運動する空間に境界条件を設定した場合、4種類の粒子配置において全ての粒子が一様の速度で運動し続ける一様流解が存在する。4種類の粒子配置は、六角形2つと四角形2つである。一様流解の摂動への安定性について線形安定性解析を用いて調べた。その結果、四角形配置の1つが、楕円モードの不安定性により、パラメーターに関係なく不安定であることがわかった。それ以外のパターンについては、安定条件について、相図であたえられる領域が安定であることがわかった。

次に、2次元OVモデルの非対称性を変更し、集団中の個体の配置と安定性の関係を調べた。非対称性の変更は、進行方向に対する相手粒子の位置を使って相互作用の強さを偏向した設定にした。この場合も、六角形2つと四角形2つの4種類の粒子配置において一様流解が存在するので、配置ごとの安定性を調べた。その結果、非対称性を変更した場合も、楕円モードはパラメーターに関係なく不安定であった。また、一様流が安定となるパラメーターの領域は、相図であたえられる。元々の非対称性と変更した非対称性の比較においては、定性的には明確な違いがあらわれなかった。

2つの非対称性を設定した場合でも、四角形配置の1つでは（前後左右に粒子が配置されている場合）、楕円モードが不安定になった。この結果は、鳥の群れにおける個体の配置を実験的に調べた研究結果とも整合していた。

次に定常状態ではなく、行動適応性と関連すると考えられる準安定な非平衡定常状態の安定性を調べることにした。行動適応性は、バクテリアからヒトまで広い生物種が生き残るために必須の性質である。周りの環境への適応性は生物が、天敵や突発的に発生した事象から逃れるために必要なプロセスである。生物集団が全体として行動適応性を持つ場合として、鳥や蟻、魚などについての研究報告がある。生物が環境に適応するというよりは、ひとつの安定状態を維持し続けるというよりも、準安定な複数の状態を遷移することが背景にあると考えられる。

魚群や鳥の群れなどの自己駆動粒子の集団運動は、集団全体としての巨視的運動が大きく揺らぎ、多数の準安定な流動形態に遷移する。また自己駆動粒子集団の運動では、高熱源から低熱源への熱流の流れのような動的安定な非平衡定常運動が見られる。非平衡定常的

な集団運動の安定性や集団全体の空間構造などを少数の特徴量であらわすことは、様々な時空間スケールで現れる運動に共通した性質を見出すために役立つであろう。実際の自己駆動粒子の集団運動は、準安定的な多数の流動形態を持ち、時間的にその形態を変化させる。そのため、平衡統計力学の考え方をそのまま使うことができないだろう。そこで我々は、確率分布関数の類似度を測る Wasserstein 測度に着目し、粒子の位置の分布を用いて巨視的な集団の形態を表現し、形態間の類似度を評価することで非平衡定常状態にある集団形態の安定性を評価した。

空間を迷路状に設定し、2次元 OV モデルの粒子の集団運動についての時系列データを作成した。作成した時系列データについて、Wasserstein 測度を用いてタイムステップごとに集団全体の形状（集団形態）を他の全てのタイムステップの形態との距離を計算した。比較によって各タイムステップ間の類似度をあらわす距離が得られた。このデータを用いて類似度をあらわす2次元空間を作成し、各時刻の集団形態を2次元空間上に点として表現した。集団形態の時間変化は、2次元空間上で連続的な軌道を描くことが明らかとなった。また、集団運動の非平衡定常状態は、力学系におけるアトラクタに類似した構造を持つことが分かった。

さらに、集団運動の非平衡定常状態の安定性と2次元 OV 粒子に設定された感応度の値の関係性を調査する。そこで、感応度の値を一様に変化させて長時間シミュレーションを行い、感応度の値ごとに時系列データから類似度を計算することで非平衡定常状態に対応するアトラクタ状の構造の比較を行なった。比較の結果、感応度の値が高くなるほど、非平衡定常状態の維持時間が長いことがわかった。

本論文の構成は、以下の通りである。第2章では、非対称散逸系として考えるべき生物と社会現象にみられる集団運動を紹介する。紹介する集団運動は、魚群、鳥の群れ、昆虫の群れ、人間の歩行者流、自動車の交通流である。第3章では、非対称散逸系のモデルを紹介する。紹介するモデルは、1次元最適速度モデル、Swarm Oscillator モデルである。第4章では、本研究でもちいる非対称散逸系の2次元 OV モデルを導入する。第5章では、異なる粒子配置ごとに2次元 OV モデルの一様流解からの摂動に対する集団運動の安定性を解析した結果を述べる。さらに、2次元 OV モデルの非対称性を変化させて、一様流の安定性と非対称性の設定の仕方との関係を調べる。第6章では、迷路状の通路内における2次元 OV 粒子集団の巨視的構造を調べる。次に、巨視的構造の時間的な変化を定量的に解析し、可視化する方法を解説する。最後に、説明した方法を用いることで、粒子の感応度と集団形態の安定性の関係を解析する。第7章で、本研究全体のまとめを述べる。