

博士論文(要約)

**自己駆動粒子系におけるエントロピーの特性と
自己駆動粒子によって体験される時間に関する研究**

東京大学大学院工学系研究科先端学際工学専攻

三浦 紋子

自らの意思で能動的に動くことができる粒子のことを自己駆動粒子と呼ぶが、その集団現象として人による旅客交通流が挙げられる。旅客交通流は、様々な交通機関による旅客の流れを含むが、特に自動車による交通流は自己駆動粒子の特徴を反映した流れとなっている。

自動車による交通流の時間発展の様子を表現する数理モデルは、空間スケールがマクロなものとして、Lighthill&Whitham らによる流体力学的モデル、ミクロなものとして Prigogine らによる気体分子運動モデル、Bando らによる運動方程式モデル等が考案されている。それぞれのモデルが、物理学における流体力学、統計力学、古典力学をベースに導出されており、自動車をニュートン力学の法則が成立する粒子として捉えている。また、物理学においては、マクロな理論である熱力学や流体力学とミクロな理論である統計力学を結ぶ物理量としてエントロピーが存在する。一方で、自動車は自己駆動粒子であり慣性の法則や作用・反作用の法則を満たさず、前方に直進している場合は自動車間の相互作用が非対称である特徴を有している。このような自己駆動粒子について、過去エントロピーの検討が行われたものの十分に議論されてこなかった。そこで、本論文では 1 つ目のテーマとして、自己駆動粒子系におけるエントロピーを再定義し、その特性を探っている。

他方、自動車は運転手により操作されていることから、自動車間の相互作用は心理的な要因に起因する。特に、自動車乗車時に運転手によって体験される時間については、実験心理学において種々の実験が行われているが、数理科学的研究はあまり行われていない。そこで、本論文の 2 つ目のテーマとして、人によって体験される時間に注目し、統計モデルの構築を行っている。

まず、自己駆動粒子系のエントロピーの特性に関する研究結果の概要を述べる。本研究では、車頭間隔に注目して自動車の位置のちらばり具合を定式化した先行研究を参考に、速度のちらばり具合を示すエントロピーをミクロの視点から新たに定義することで、系全体のエントロピー、相互情報量を定式化した。高速道路における 3 台の自動車の追従走行実験のデータを利用して、相互情報量を算出したところ、3 台の平均速度が高いが、3 台の平均車間距離が広い場合と狭い場合で、相互情報量が異なる値をとることがわかり、平均速度が高く平均車間距離が狭い状態、つまり渋滞が発生する直前の状況（メタ安定状態）を相互情報量で検知できることがわかった。また、上記のメタ安定状態を再現することが可能な交通流ミクロモデルである SOV (Stochastic optimal velocity) モデルと ZRP+SLS (Zero range process + Slow start) モデルを用いて、一車線単路周期系における交通流シミュレーションを行い、定式化したエントロピーの時間発展の様子を探った。その結果、時間発展とともに系全体のエントロピーが増大する様子が確かめられたが、メタ安定状態が発生する車両密度では系全体のエントロピーが時間発展とともに減少する様子が見られた。具体的には渋滞していない状態から、渋滞している状態に遷移する場合にエントロピーが減少しており、このときにエネルギーの散逸が発生していると推測された。そこで、エネルギーの散逸の様子を明らかにするために、先行研究で定式化されている交通温度 T を用いて、 T - $S(X,Y)$ 線図（温度—エントロピー線図）を描画したところ、メタ安定状態が発生する密度において、交通流が自由流から渋滞流に遷移すると熱が散逸していることが確かめられた。また、 $T=0$ となる場合にエントロピーが 0 となることも確かめられた。これにより、時間発

展によりエントロピーが減少するように見えた現象が、熱の散逸を伴っていることから、熱が捨てられた外界も含めた系全体としては、エントロピーが増大していることが明らかとなった。

次に、人によって体験される時間のモデルの構築に関する研究結果の概要を述べる。本研究では、航空機乗降時の体験される時間に着目し、搭乗客がどのように乗降時間を評価したかを実験により把握した。その結果、体験される時間と計測時間の比を変数とする搭乗客分布が正に歪んだ分布となり、体験される時間が計測時間よりも長くなる搭乗客の割合が実験条件により異なることが明らかとなった。この分布を **ex-Gaussian** 分布を用いてモデル化し、**ex-Gaussian** 分布の尾の引き方の長さを表現するパラメータである τ が、搭乗率、座席ピッチ、乗車・降車方法により変化することがわかった。以上の要因を変化させることで、乗降時に体験される時間が計測時間よりも長いと感じる一部の搭乗客に対して、体験される時間を短くできる可能性があることが明らかとなった。

以上の研究の共通項の一点目として、自己駆動粒子の不可逆性が挙げられる。自己駆動粒子系におけるエントロピーの特性の研究から、自己駆動粒子において渋滞が形成されない場合は可逆変化だが、渋滞が形成される場合は不可逆変化であることが明らかとなった。また、自己駆動粒子系によって体験される時間は不可逆な性質をもち、体験される時間は物理学的時間から歪むという特徴が見られることがわかった。

共通項の二点目として、歪みが挙げられる。情報理論においては、エントロピーはメッセージの圧縮しやすさと関係がある一方で、体験される時間と物理学的時間の比は時間の歪み率をあらわす。圧縮性は歪みの一種であることから、本研究は自己駆動粒子系における歪みの特徴を明らかにしたものであると言えるだろう。

また、自己駆動粒子系のエントロピーの研究は、自己駆動粒子の位置や速度を基本としたエントロピーに関する研究であり、自己駆動粒子を客観的立場から観察したときの特徴を明らかにしている。一方で、自己駆動粒子によって体験される時間の研究は、主観的立場から観察したときの特徴を明らかにしている。自己駆動粒子の時間発展の方程式は現在のところ、物理学的時間による微分の形式をとっており、客観的立場からの表現となっている。しかし、自己駆動粒子の主観的立場による運動方程式を立てる場合は、体験される時間による微分の形式をとることも可能であると考えられる。