

## 論文審査の結果の要旨

氏名 鈴木 量

本論文は7章からなる。第1章は序論であり、研究の背景と目的が述べられている。第2章では本研究で用いたヤヌス粒子（金を半球上に蒸着したポリエチレンビーズ）が交流電場中で電場と垂直方向に動く原理について説明している。第3章ではヤヌス粒子の製造法、実験系の設定について記述している。第4章から6章では、実験結果を示すとともに考察を行っている。第4章では運動の方向と粒子間の相互作用についての周波数依存性を調べている。第5章では、この実験系でゆらぎの定理が成り立つことを示し、回転のトルクを見積もっている。第6章では粒子の集団運動を解析し、高密度において熱平衡状態で見られるランダムな分布とは異なる振る舞いをすることを示した。第7章では、本研究の結論が述べられている。

我々人間を含めて、生き物はエネルギーを消費しつつ、能動的に動いている。このような自己駆動する物体の運動を物理として一般的にとらえようという機運が非平衡物理の研究者にあり、そのモデル系として自己駆動する粒子の運動が最近、盛んに研究されている。本研究で用いた電場による運動は、化学反応による運動に比べて、運動速度などを容易に制御できる長所がある。また、エネルギーを常に供給しているので長時間の観測も可能である。従って、自己駆動する物体の物理現象を調べるモデル実験系のひとつとして、今後の発展が期待できる。

ヤヌス粒子の電場による運動について、これまでに直線上の運動とその速度依存性については報告されていたが、周波数依存性については調べられていなかった。論文提出者は周波数によって3つの運動モードがあることを発見した。低周波では、運動は行わず、粒子間には引力が働き、凝集する。中間の周波数では金の凝着面の方向に運動し、粒子間には斥力が働く。高周波では運動の方向が逆転し、ポリエチレンの面の方向に運動し、粒子間には引力が働く。これらの運動は電場で誘起された粒子表面上の電荷による電気浸透流によるものである。論文提出者は、金属と誘電体の部分における電気二重層を形成する時間の差を考慮することによって、運動方向の反転も定量的に理解できることを示した。実験で得られる塩濃度、粒子半径依存性も定量的に説明できる。粒子間

の相互作用が反転することは誘電体が高周波数では交流電場に追従できなくなることによって説明できる。このように論文提出者は電場周波数を変えることで運動方向と粒子間の相互作用を制御できること示し、そのメカニズムもしっかりと解析している。

第5章において、2つのヤヌス粒子が接着した **doublet** を用いて、ゆらぎの定理を検証している。ゆらぎの定理は90年代半ばに提案された非平衡状態でも成り立つ比較的新しい定理である。まだ、実験系での検証例はそれほど多くない。高周波領域において、基板上に接着したヤヌス粒子の周りをその粒子に接着したヤヌス粒子が回転することがあることに見て、論文提出者はゆらぎの定理の検証に適していることに気づき、検証を行っている。回転の前後への遷移確率が、ゆらぎの定理の関係を満たすことを確認し、その大きさから、回転のトルクを見積もった。回転速度と粘性からくる回転の摩擦抵抗から見積もったトルクを誤差の範囲内で一致することを示し、トルクからも、ゆらぎの定理が成り立っていることを明らかにした。また、ゆらぎの定理を用いると回転速度を用いるよりもトルクを精度よく見積もれることが示した。この測定法は細胞運動など複雑な自己駆動物体の解析にも有効であると思われる。

第6章において、ヤヌス粒子の集団運動を解析している。まず、粒子間の運動の相関を調べ、近接粒子では運動方向が揃う傾向があることを示した。密度ゆらぎを、粒子数の測定空間の長さ依存性を調べた。低密度では熱平衡で見られるような中心極限定理が成り立つが、高密度では成り立たないことを示した。このような空間分布の非一様性は自己駆動する物体の集団運動に特徴的なものであると思われる。

以上のように本論文では、非対称基板上を回転する粒子の運動の周波数依存性とその動作原理を明らかにするとともに、この実験系を用いて、ゆらぎの定理の検証、粒子の集団運動の新しい知見も得ている。論文提出者の構築した実験系はエネルギーを消費して運動する粒子の実験系の中でも、制御が容易で長時間観察可能であり、今後の非平衡物理学の発展への寄与が期待できる。なお本論文は指導教員である佐野雅己氏（全般）と佐野研究室ポスドク研究員の **Hong-Ren Jiang**（4章）の共同研究であるが、論文提出者が主体となって研究を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、審査員全員の一致により、博士（理学）の学位を授与できると認める。