

論文審査の結果の要旨

氏名 中本（加藤） 愛理

本研究は、周期的に駆動される自己駆動粒子のダイナミクスに関する実験的・理論的研究である。論文は、6章からなる。

第1章では、自己駆動粒子系の分野への導入と研究の動機を説明している。多くの研究では、1粒子レベルでの運動が一定の駆動力（駆動速度）で一方向的に運動する粒子が取り扱われてきた。実験的にはバクテリアなどの生物だけでなく、外部からエネルギーを加えても自己駆動粒子とみなせるヤヌス粒子のような人工的な系も用いられ、一方向的運動が観察されてきた。しかし、自己駆動粒子系の一粒子レベルの運動は一方向的なものに限らず、二方向的な運動、往復運動など多彩である。本論文では、制御された周波数で往復運動する系を作成し、その性質を見ることを目的とし、交流電場で駆動するクインケ粒子系が用いられた。クインケ粒子とは、イオンの入った液体中の誘電体粒子が直流電場下で電極上を転がることで駆動するものである。

第2章では、駆動原理となっている電気流体効果のクインケ効果と、先行研究での直流下のクインケ粒子についての定量的な説明が解説されている。粒子の並進速度は分極に依存するが、直流の場合は分極の非線形微分方程式が固定点を持ち、その結果定常状態で一定速度の運動となる。粒子同士の相互作用は、分極同士の静電相互作用と流体相互作用からなる。また、クインケ効果に関連した研究や、直流下でのクインケ粒子の集団運動についても解説されている。

第3章では、クインケ粒子の実験のセットアップおよび画像解析の方法が説明されている。直径5マイクロメートルのポリスチレン粒子を透明電極間に導入し、交流電場が負荷された。運動は高速カメラを用いて毎秒2000コマで撮影された。

第4章では、交流下クインケ粒子の1粒子の運動を実験的・理論的に調べている。実験の結果、交流下のクインケ粒子は印加電場の周波数で往復運動するとともに、周期の100倍程度に長い時間スケールの持続的な運動がみられた。往復運動は、クインケ粒子の一粒子の理論を交流に拡張することで説明でき、数学的には非線形微分方程式の安定な周期解に対応している。また、周期状態での速度のパワースペクトルは奇数次のみのピークをもつことがわかった。いっぽう、長い時間スケールの運動はその理論では説明されない非自明な現象である。また、実験で得られた平均二乗変位の指数は振動的で *superballistic* なふるまいがみられた。振動的かつ *superballistic* な振る舞い自体は、速度を直流成分と正弦波の和であると仮定した簡単なモデルでも再現するこ

とができた。

第5章では、自発的に形成するクラスタの運動について実験的に調べている。希薄系では2、3粒子からなるクラスタを頻繁に形成することを発見した。これは直流下ではみられていなかった現象である。2、3粒子系は各々が往復運動しながらも一粒子と同様に長い時間スケールの運動もともなった。速度のパワースペクトルが一粒子の理論で期待される奇数次(1、3次)ピークを持つだけでなく偶数次(2、4次)のピークも持つことがわかった。これは dipole-dipole 相互作用のためと考えられる。2粒子系では、一方の粒子に対する他方の粒子の相対的な駆動方向は粒子の駆動方向に対してほとんど左右対称だが、3粒子系では非対称性であることが実験的にわかった。これは3体相互作用によると考えられる。

第6章では、まとめと展望が述べられている。特に展望に関して、この論文で行われた研究は、さまざまな時間依存をする自己駆動粒子系の研究に発展すると考えられる。また、多粒子系の実験的研究では集団運動や揺らぎなど統計的な性質を見ることが多く、その際相互作用は平均場など実効的なものが想定されるが、実際どのような相互作用なのかはわかっていない。その点で、相互作用が計算できる系で2、3粒子の運動が調べられたことは、より多い粒子数の集団運動への理解につながると考えられる。

本論文は、従来の1粒子でかつ一方向電場におけるクインケ粒子系の研究に対して、2方向の交流電場を与えたこと、さらに複数粒子系の運動を解析した点が新しく、クインケ粒子研究に新たな知見を与えるものである。

なお、本論文第3,4,5章は、佐野雅己、竹内一将との共同研究であるが、論文提出者が主体となって実験および解析を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断した。

したがって、博士(理学)の学位を授与できると認める。