

Rotational motion of externally driven anisotropic particles in complex fluids

齊藤, 圭太

<https://hdl.handle.net/2324/7182299>

出版情報 : Kyushu University, 2023, 博士 (理学) , 課程博士
バージョン :
権利関係 :



氏 名 : 齊藤 圭太

論 文 名 : Rotational motion of externally driven anisotropic particles in complex fluids
(複雑流体中における外部駆動異方性粒子の回転運動)

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 旨

コロイド、高分子、細胞などの柔らかい物質はソフトマターと呼ばれ、我々の身の回りに多く存在している。微小な物体を操作・観測する技術が進歩したことで、サブマイクロスケールの構造がソフトマターの物性に重要な役割を担っていることが明らかになってきた。さらに近年、自ら動く仕組みを持っている自己駆動微粒子（以下、アクティブ粒子）の作成・制御技術の発展により、これら粒子により局所駆動された非平衡ソフトマター系の構築も可能となっている。これら系は、新規物性材料や微生物の運動理解するためのモデル系としても期待され、盛んに研究が行われている。多くの研究では、アクティブ粒子の並進運動に注目したものが多く、粒子の向き検出の問題から、回転運動についてはあまり注目されていなかった。しかし近年、コロイド濃厚系や高分子溶液などのソフトマター中に分散する微小な物体では、特徴的な回転運動が報告されており、回転運動を理解する重要性が認識されはじめてきた。さらに、微小物体の回転運動を制御することは、局所流動場の制御などにも繋がり、マイクロスケールでのソフトマター研究に有用なツールになると考えられる。そこで我々は、粒子の向き検出と運動制御が可能な粒子を作成するため、微粒子合成手法の発展により簡便な作成が可能となった異方性粒子に注目した。この技術を利用することで、内部構造に異方性を持つ液晶液滴と、粒子表面に性質の異なる領域を持つヤヌス粒子を作成した。本研究では、外場を用いてアクティブ粒子の並進・回転運動を制御することで、複雑流体中に存在する粒子の回転運動の系統的な理解を目指した。

まず我々は、回転運動が制御できる液晶液滴を作成し、液滴の内部構造と運動メカニズムの関係解明に取り組んだ。複屈折を持つ粒子は、光電場の振動方向が回転する円偏光を照射することで、回転することが知られており、液晶液滴も複屈折を有するため、円偏光による回転が可能となる。実験では、円偏光光ピンセットを用いることで、液晶液滴の回転制御を行った。最初に、液滴の大きさ、液晶の種類（ネマチック液晶、コレステリック液晶）を変化させることで内部構造を制御し、その回転運動について調べた。実験の結果、液滴の内部構造に応じて回転メカニズムが変化することがわかった。ネマチック液晶の場合、大きい粒子では（直径約 5 μm 以上）、bipolar 型の内部構造を形成し、液滴内部の光路長が光の振動方向で異なることに起因する現象（波長板効果）により回転運動が誘起されることがわかった。一方、小さい粒子の場合、内部構造は preradial 型となり、散乱角が光の振動方向によって異なることに起因する現象（散乱効果）により、回転が引き起こされることがわかった。一方、内部にらせん構造をもつコレステリック液晶液滴では、らせんのピッチ長より粒径が大きい場合にのみ回転が誘起された。誘起される回転の向きは、液滴内部のらせんの向きと同じ方向のみであり、液滴内部のらせん構造起因したブラッグ反射がトルクの受け渡しに寄与しているとわかった。さらに、作成した液晶液滴のエネルギー効率を評価したところ、bipolar 型の液滴が一番高いエネルギー効率を有していることがわかった。

次に我々は、エネルギー効率の良い bipolar 型の液滴を用いて、マイクロ流動場の構築、局所粘度測定を行った。最初に、回転液滴が周囲に誘起する流動場について調べた。水中の場合、回転液滴が誘起する流動場は、理論値との比較から、固体粒子の回転が誘起する流動場と一致することがわかった。これは、液晶の粘度が周囲の媒質の粘度よりも十分高いため、固体として振る舞っていると考えられる。一方、粘度が高いグリセリン水溶液中で同様の実験したところ、回転液滴が誘起する流動場は、水中で一致した理論値が予測する値より、小さくなることがわかった。この速度低下の原因を明らかにすべく、媒質の粘度上昇に伴う駆動力の変化や液滴内部の流動化を検討した結果、液滴表面でのスリップが主な原因であると示唆された。そこで、液滴表面でのスリップを考慮した流動場の式を適用すると、実験結果を説明することができた。さらに、グリセリン濃度を上昇させると、液滴表面でのスリップが促進されるという新たな知見も得ることができた。これら回転液滴の応用として、次に我々は、マイクロ回転粘度計を構築し、溶液の局所粘度測定に取り組んだ。さらに、この液晶液滴と焦点でのトラップパターンの制御が可能なホログラフィック光ピンセットを組み合わせることで、マイクロ流動場の空間制御や液滴間の流体相互作用の計測にも成功した。

これまで、粒子を回転制御することでその回転運動について調べてきたが、並進運動により回転運動が促進される可能性も考えられる。例えば、ソフトマター中を運動する微小物体は、高分子や他の物体がその周囲に存在するため、それらとの衝突により粒子の向きが変化すると予想される。このような振る舞いを理解するために、並進運動の制御と向き検出が可能である、半球に Cr がコートされたヤヌス粒子を用いて、並進運動が回転運動に与える影響について調べた。実験では、高分子溶液中に分散したヤヌス粒子に交流電場を印加することで粒子を駆動し、印加電場の振幅を変化させることで、駆動速度の制御を行った。その結果、粒子の並進速度が小さい場合には、粒子の回転運動は拡散的であった。一方、ある閾値以上の速度になると、等速で円運動することがわかった。水中で行った同様の実験では、回転運動は常に拡散的であったことから、粒子が等速回転する現象は、粘弾性体特有の効果であることがわかった。粘弾性体からの時間遅れの復元力を考慮した粒子の回転速度の理論値は実験結果と良い一致を見せた。また、回転拡散運動から等速回転運動への切り替わりは、高分子ネットワークの緩和時間と粒子の移動時間の比で決定されるワイゼンベルグ数により決まることがわかった。

以上のような本論文で得られた複雑流体中での光および電場駆動マイクロ回転粒子系に関する知見は、ソフトマターの局所物性測定やソフトマター中を運動する微生物の運動解明などの基礎研究から、局所流動場の精密制御が有用な細胞分離などの応用面まで多岐にわたる分野に対して意義ある重要なものである。