

学 位 論 文 題 名

偏光レーザービームにより捕捉された
液晶液滴の挙動に関する研究

学位論文内容の要旨

近年マイクロ・ナノテクノロジーの進展に伴い、これらの技術とバイオテクノロジーを融合したナノバイオテクノロジーの研究開発が急速に展開している。アクチン・ミオシン系、微小管・キネシン系に代表される分子モーターは、化学エネルギーを力学エネルギーに変換するタンパク素子であり、生体のさまざまな運動に重要な役割を果たしていることから、その動作原理の解明が強く求められている。さらに、分子モーターは一分子でモーターとして機能し、自己組織化機能を有することから、ナノアクチュエーターとしての利用も提唱されている。

このような分子モーターの運動メカニズムの解明、またマイクロ・ナノアクチュエーターの開発において、ミクロ・メゾスコピック領域におけるトライボロジーのメカニズムを明らかにすることは極めて重要である。微小領域におけるトライボロジーを研究するには、微小物質を非接触で操作する手法の開発が重要であるが、その一つの有力な方法論としてレーザーマニピュレーション法が存在する。光は運動量を持つため、吸収、反射、屈折により運動量変化が生じたとき放射圧が発生する。顕微鏡用対物レンズなどで集光したレーザー光を、周囲の溶媒と比べ屈折率の高い微粒子に照射すると、光の放射圧によって粒子をレーザー光の焦点付近に捕捉することができ、さらにレーザー光の焦点位置を移動させると微粒子はそれに追従するため、3次元的なマニピュレーションが可能である。この現象は1986年に Ashkin らにより見出され、すでに物理学、化学、生物学、機械工学など幅広い分野でさまざまな微粒子の捕捉に関する研究が行われている。さらにレーザーの偏光を利用することで、捕捉、移動の他に、捕捉した微粒子にトルクを作用させることも可能であることから、レーザーマニピュレーションは微小領域におけるトライボロジーを解明する手法として極めて有効であるといえる。そこで本研究は、光学的に異方性を持つマイクロメートルオーダーの液晶液滴を偏光レーザービームを用いて捕捉し、液晶液滴の回転挙動の解析を行った。その上で液-液界面における微小領域でのトライボロジーを明らかにすることを目的とした。

本研究では液晶としてネマチック液晶、及びスメクチックA液晶を用いた。液晶を重水中に分散させることによって1～10マイクロメートルの液滴にし、さらにそこへ界面活性剤の量を変化させて添加することにより試料を作製した。捕捉用レーザーとしてCW Nd:YAG Laser の基本波（1064 ナノメートル）

を用い、液晶液滴を偏光顕微鏡下でレーザー捕捉した。ネマチック液晶を液滴にするとバイポーラ構造と呼ばれる分子配向をとり、偏光顕微鏡下ではマルテゼクロスと呼ばれる十字型の模様が観察される。界面活性剤を添加すると、濃度が低い状態ではバイポーラ構造であるが、濃度が高くなるとバイポーラ構造はもはや保てなくなり、ラディアル構造と呼ばれる分子配向に変化する。一方スメクチックA液晶においては界面活性剤を添加しない状態においてラディアル構造を形成する。これらの液晶液滴を偏光レーザービームを用いて捕捉し、そのときの回転挙動をCCDカメラによる画像処理、及び液滴を透過したレーザー光の偏光状態を検出することにより解析を行った。

バイポーラ構造の液晶液滴を円偏光レーザービームによりトラップすると、液滴は回転し、その回転速度はレーザーパワー、粒径に依存することが明らかとなった。また、界面活性剤を液滴の分子配向が変化しない領域で添加すると、回転周波数が変化することが観察された。さらに液滴を透過したレーザー光の偏光状態を解析することで液滴に働くトルクを測定し、そのデータを基にマイクロ領域における重水の粘度の値を求めた。その結果、ネマチック液晶の種類によって得られる粘度の値が異なることが明らかとなった。また、捕捉する液滴の粒径により粘度の値が変化することが観察された。これらは液晶の親水性・疎水性による液-液界面の状態の違いによるものと考えられる。

ラディアル構造のネマチック液晶液滴を直線偏光でレーザートラップした場合、中心から外れた位置でトラップされ、レーザーパワーを変えることで液滴の捕捉する位置が変化する現象が観察された。円偏光の場合には中心でトラップされ、液滴の分子配向に構造変化が見られた。捕捉するレーザー光のパワーを増加させると、あるレーザーパワーの値から液滴にぶれが生じ、液滴自身が回転している様子が観察された。また、液滴が回転している状態では、レーザーパワーを変化させても回転速度は変わらずほぼ一定となった。さらに楕円偏光の状態では、楕円率を円偏光の状態から低下させると、ある楕円率から液滴の運動にぶれが生じ、さらに楕円率を下げることによってぶれが止まる現象が観察された。

スメクチックA液晶の液晶液滴を直線偏光でレーザートラップすると、中心から外れた位置でトラップされ、その位置はレーザーパワーによって変化しないことが明らかとなった。一方、円偏光でトラップすると、直線偏光で捕捉した場合と同一の場所で捕捉され、その位置を中心として液滴が移動する様子が観察された。また液滴は数周回転した後、停止することが明らかとなった。

本論文は6章から構成されている。以下に各章の概略を述べる。

第1章では、レーザーマニピュレーション法の原理、及び焦点付近での捕捉力、光トルクについて解説した。また、近年の微小界面におけるトライボロジーの研究動向について概説し、その上で本研究を行う意義、目的について述べた。

第2章では、本研究で用いたレーザーマニピュレーションの装置及び液晶液滴の回転挙動の解析手法について解説した。また界面活性剤を添加することによる液晶液滴の分子配向の変化についても述べた。

第3章では、バイポーラ構造を持つネマチック液晶液滴を偏光レーザービームで捕捉したときの液滴の挙動について述べた。さらに、液滴と重水との液-液界面におけるマイクロ領域での重水の粘度について議論した。

第4章では、ラディアル構造を有するネマチック液晶液滴を偏光レーザービームで捕捉したときの液滴の挙動について述べた。特にレーザー光の偏光状態と液滴の挙動の関係について詳細に考察した。

第5章では、スメクチック A 液晶液滴をレーザートラップしたときの液滴の挙動について述べた。また、第4章で議論した液滴の挙動と比較したうえで、液滴に働くレーザー光のトラップ力について議論した。

第6章では、これまでの研究成果の総括、及び今後の展望について述べた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 三 澤 弘 明

副 査 教 授 末 宗 幾 夫

副 査 教 授 笹 木 敬 司

副 査 助 教 授 Saulius Juodkazis

学 位 論 文 題 名

偏光レーザービームにより捕捉された 液晶液滴の挙動に関する研究

ミクロ、メゾスコピック領域におけるトライボロジーの物理学的描像を明らかにすることは、マイクロ・ナノメートルオーダーの人工的なアクチュエーターを実現する上で極めて重要となる。たとえば、生体内のタンパク質間の相互作用によって実現される分子モーターの滑り運動、バクテリアのべん毛モーターの回転運動の詳細なメカニズムの解明にも、この微小領域におけるトライボロジーの解明が重要な役割を果たすと考えられている。このような微小領域におけるトライボロジーを研究するためには、微小物質を非接触で操作する手法が必要不可欠であるが、その一つの実用的な方法論としてレーザーマニピュレーション法が存在する。これまでに固体微粒子をレーザートラップし、その回転挙動を解析することで、微小領域、すなわち固-液界面におけるトライボロジーに関する報告はあるが、微粒子自体が完全な球体でないため、精密な解析は不可能であった。本論文では、マイクロメートルオーダーの完全球体を有する液晶液滴をレーザーマニピュレーション法により捕捉・回転させ、微粒子の回転挙動を解析することで、微粒子と周囲の溶媒との液-液界面におけるトライボロジーを明らかにすることを目的としている。

本研究では液晶としてネマチック液晶、及びスメクチックA液晶を用いている。液晶を重水中に分散させることで1～15マイクロメートルの液滴にし、さらに界面活性剤を添加することで試料を作製している。捕捉用レーザーとしてCW Nd:YAGレーザーの基本波(1,064 nm)を用い、液晶液滴を偏光顕微鏡下でレーザートラップしている。本研究ではバイポーラ構造、ラディアル構造を有する液晶液滴をそれぞれ偏光レーザービームによりトラップしたときの液滴の挙動を観測している。また、バイポーラ構造の液晶液滴の回転挙動を基に、液晶液滴と重水との界面におけるトライボロジーの解析を行っている。

バイポーラ構造のネマチック液晶液滴を直線偏光レーザービームによりトラップし、偏光方向を回転させると、それに追従して液滴が回転する様子を観察している。また円偏光レーザービームによりトラップすると、液滴は高速回転($\sim 1,500$ Hz)し、その回転速度はレーザーパワー、粒径に依存することを明らかにした。さらに分子構造の異なるネマチック液晶について液晶液滴の回転挙動を観測し、それらを基に液晶液滴と重水との界面におけるトライボロジーの解析を行った結果、液晶の種類によって界面の

トライボロジーの効果が異なることを明らかにした。これらの違いは液晶の疎水性・親水性、界面張力の影響によるものと考えられ、本研究の結果は分子レベルで起こる運動のメカニズムを類推する糸口になると期待される。一方楕円偏光レーザービームにより液滴をトラップし、その回転挙動を解析することにより、液晶液滴の複屈折を測定することにも成功し、ネマチック液晶CB5、E44の液晶液滴の複屈折がそれぞれ0.04、0.11となることを明らかにした。

ラディアル構造のネマチック液晶液滴を直線偏光レーザービームによりトラップした場合、中心から外れた位置でトラップされ、レーザーパワーを変えることで液滴の捕捉する位置がサブマイクロメートルオーダーで変化する現象を観察している。円偏光レーザービームの場合には中心でトラップされ、液滴の分子配向に構造変化が見られることを明らかにした。捕捉するレーザー光のパワーを増加させると、あるレーザーパワーの値から液滴にぶれが生じ、液滴自身が回転している様子を観察している。また、液滴が回転している状態では、レーザーパワーを変化させても回転速度は変わらず一定となることを明らかにした。さらに楕円偏光レーザービームによりトラップし液滴の回転挙動を解析することで、トラップしたときの液晶液滴の分子配向が等方性構造から異方性構造へ変化することを明らかにし、そのときの複屈折は0.022となることを示した。

ラディアル構造のスメクチックA液晶の液晶液滴を直線偏光レーザービームによりトラップすると、中心から外れた位置でトラップされ、その位置はレーザーパワーによって変化しないことを明らかにした。一方、円偏光レーザービームでトラップし、その回転挙動を解析することで、集光レーザービームの捕捉力、偏心率の解析を行い、その結果、偏心率は3.5となることを明らかにした。

これを要するに、著者は、それぞれ異なる分子配向を持つ液晶液滴を偏光レーザービームによりトラップしたときの液滴の挙動を観測することで、液滴の種類、分子配向により異なる挙動が現れることを明らかにし、さらにバイポーラ構造の液晶液滴の回転挙動を解析することで、液晶液滴表面の疎水性・親水性、界面張力が液滴と周囲の溶媒との液-液界面におけるトライボロジーに大きく影響していることを明らかにしており、著者の研究は微小領域におけるトライボロジーの分野に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（情報科学）の学位を授与される資格あるものと認める。