

論文審査の結果の要旨

氏名 山本尚貴

本論文は6章からなる。第1章は一般的なイントロダクションである。まず、エントロピー生成の原理、温度・濃度勾配に対する物質流の定式化などの非平衡熱力学の基礎が書かれている。次に、本論文の中心であるキラリティーをもつコレステリック液晶の紹介、キラリティーを理論に取り込むための擬スカラーの説明が行われ、最後に本論文のオーバービューが述べられている。オーバービューでは、単に本論文のアウトラインの説明ではなく、本論文の第1の主題である **Lehmann** 効果（温度勾配下におけるコレステリック液晶のパターン形成）の歴史的なデータが紹介され、さらに第2の主題であるキラリティーにより引き起こされる自発的らせん運動のいくつかの例が挙げられている。

第2章は **Lehmann** 効果に対するより詳細なイントロダクションである。まず、**Lehmann** 効果を理論的に取り扱う際の基礎となる流体力学理論である **Ericksen-Leslie** 理論が詳細に解説されている。次に、山本氏の研究に直接関連する先行研究である **Oswald** の研究が紹介されている。**Lehmann** 効果は1900年に発見された古い現象であるが、**Oswald** は2008年に現代的な実験のセットアップによりコレステリック液晶の液滴が2種類（**stripe** 型と **target** 型）の特徴的なパターンをもち、それが回転運動することを示している。第1章および第2章により、本論文のバックグラウンドは十分に説明されている。

第3章からが本研究の実験結果、解析の章である。第3章では、まず **Lehmann** 効果に対する実験手法が述べられている。約0.5mmギャップの2枚のガラス板の間に、0.002Kの精度で約1Kの温度勾配をかけている。また、ガラス表面を化学修飾することにより液滴のアンカリング状態を変化させている。そのような非常に繊細な実験の結果、**Oswald** の結果を再現するだけでなく、**stripe** 型と **target** 型の間接的なパターン（**stripeless** 型）の液滴や回転しない **stripe** 型液滴を見いだしている。山本氏の実験で完全に新しいのは、共焦点顕微鏡を用いることにより、液滴を深さ方向に観測し、液滴のパターンの3次元像を示したことである。これにより、ガラス板のアンカリング条件が温度勾配の方向とコ

レステリック液晶のらせん軸の間の角度をコントロールしていることが明らかになった。さらに山本氏は、液滴の表面トルクを導入した現象論的モデルを構築し、液滴の回転速度と液滴サイズの関係性を定性的に説明することにも成功している。

第4章はコレステリック液晶の液滴を界面活性剤水溶液に滴下したときに生じる自発運動の実験の章である。この章の初めに、Herminghaus らが最近行ったネマチック液晶を用いた同種の実験の論文が引用され、自発的並進運動が液滴内部の Marangoni 対流により生じた液滴表面の界面活性剤の濃度勾配（表面張力勾配につながる）によることが示されている。山本氏は本章の実験においても、Femtojet と呼ばれるマイクロインジェクション装置を用い、大きさがよく制御できた液滴を作成するなど、多くの実験上の工夫をしている。また、顕微鏡下で、単純な画像処理ソフトを用いるのではなく、目視で焦点を調節しながら、非常に丁寧に3次元の軌跡を観測している。その結果、液滴内部の構造が時間とともに相転移のように変化し、それと同期して自発並進運動の軌跡が変化することを明らかにした。また、液滴内部にらせん構造 (stripe 構造) が生じるとらせん並進運動が始まることを見いだした。この運動はキラリティーに誘起される人工的（生物由来ではない）な自発運動 (Chiral Microswimmer) の初めての観測であり、科学的価値は大きい。

第5章では、4章で得られた実験結果を説明する理論モデルを提案している。このモデルは、太田らの非球形変形粒子の自発運動のモデルを、らせん軸場をもつ球形液滴に応用したものである。並進運動に関する擬スカラー係数と回転運動に関する擬スカラー係数のカップリングの強さを変化させることにより、自発的らせん運動を再現するだけでなく、回転のみで直進する相や動かない相を含む相図を得ている。

なお、本論文の第3章は黒田真史氏、佐野雅己氏との共同研究、第4章、第5章は佐野雅己氏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する。

以上に述べたように、本論文は、キラリティーが誘起する自発運動、特にらせん運動という未開拓な研究対象において、実験結果の新規性、理論解析の両面で非常に優れており、十分に博士（理学）の学位を授与できると認める。