

学 位 審 査 報 告 書

(ふりがな) 氏 名	チェン ヨンジュン 陈 永军
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 号
学位授与の日付	平成 年 月 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	理学研究科 物理学・宇宙物理学 専攻
(学位論文題目) Autonomous Motion Induced by Marangoni-Driven Spreading Under Chemical Nonequilibrium (化学非平衡条件下、マランゴニ効果が誘起する自律運動)	
論 文 調 査 委 員	(主査) 吉川 研一 教授 太田 隆夫 教授 市川 正敏 講師

京都大学	博士（理学）	氏名	陈永军
論文題目	Autonomous Motion Induced by Marangoni-Driven Spreading Under Chemical Nonequilibrium (化学非平衡条件下、マランゴニ効果が誘起する自律運動)		
(論文内容の要旨)			
第1章では、本論文の研究の基盤となるこれまでの研究の流れや、すでに確立されている知見が概説されている。具体的には、濡れと撥水の現象と、それと深く関わっている界面不安定性の従来の研究が紹介されている。また、本論文の研究内容に関係している、パターンの自律的な時間発展に関するこれまでの研究の、発展段階が論じられている。 第2章は、水溶液相において $\sim \text{cm/s}$ の速度で動く油滴の自発運動に関する研究である。油滴は、円筒状のガラス容器の中で周回運動もしくは直線運動のどちらかのモードを選択し、その運動のモードは油滴の運動方向の初期状態に依存して決定されることがわかった。油滴の自走速度は油滴の体積と水溶液相に含まれる油分の濃度に依存している。油滴の体積と水溶液相に含まれる油分の濃度が増加するにつれ、その動きの速度は減少してゆく。油滴のこの特異的な運動を、化学非平衡下におけるマランゴニ対流に駆動される油分子の拡散に関係づけて議論をしている。その議論をもとに、縮約した単純な微分方程式を使用してシミュレーションを行い、円筒ガラス容器における油滴の2つの運動モードを再現している 自発運動のその他の興味深い系として、第3章では、活性アルコール溶液フィルムによって形成される、動的な迷路パターン生成が報告されている。その動的な迷路パターンは、空気／ペンターノール／水溶液の三相の接触線に沿って生じている。この接触線は初期状態として、ディスク形状のドメインから時間発展しており、実験から迷路パターンの周長と面積、双方において明瞭な時間依存が見られた。その周辺の長さや面積の動的性質を調べるため、時間発展の自己相関解析を行い、パターン形状との間で、強い幾何学的な相関があることを明らかにしている。さらに、迷路パターン形状は自律復帰する性質があることも明らかにした。このような迷路パターンの動的な振る舞いは、従来から報告されている定常的な迷路パターンの振る舞いとは著しく異なっている。観察された動的迷路パターンの本質的な性質は、拡散に支配された幾何学的なモデルによって再現できることが示された。 第4章では、第3章で議論された動的迷路パターンの成長ダイナミクスを、主として理論的に研究している。曲率に駆動されたラプラシアン成長から始まる Kardar-Parisi-Zhang (KPZ) 方程式を利用して定式化を行い、数値シミュレーションから、動的迷路パターンの界面成長の荒さがスケーリング則を示すことが明らかになった。そのスケーリング則は、$W \sim t^\beta$ で、$\beta \approx 0.50$ となっている。ここで、W は界面の幅を、t は時間を表している。さらに考察をすすめて、動的迷路パターンのような曲率に駆動された成長も、KPZ 理論の普遍的なクラスに属していることが明らかにした。 第5章では、この論文の結論が論じられている。			

(論文審査の結果の要旨)

本論文では、液／液系における界面の不安定性とそれに起因する液滴の自発運動に関する研究が行われている。油滴周辺の濃度揺らぎにより表面張力のバランスが破れた時、油滴が自発運動を行う。これは、化学エネルギーが運動エネルギーに直接変換されているシステムであり、ミクロな分子レベルの化学ポテンシャルから高次の運動モードが引き起こされている点が生物運動に類似している。このような非生物系の自発運動の基礎的な原理を研究する事は、生物系の運動現象の研究に示唆を与えるものと期待される。後半ではパターン形成と運動のカップリングについて論じている。アメーバなどの生物の運動を考えると、体の変形と運動が密接に関係している。生物の運動を理解する上で境界の形状の変化と運動のカップリングを明らかにすることは重要であるが、生物を直接扱うと系が非常に複雑であり解析が困難であり、因果関係が不明となることが多い。そこで生物の運動を非平衡開放系における自発的運動ととらえ、単純なモデル系を用いて、形状変化と運動のカップリングを調べることは、生物の運動の理解に繋がると期待される。このように非平衡開放系の自発運動や、境界の形状変化と運動のカップリングを調べた本研究は学問的な意義が大きいと考えられる。

本論文の第2章では、マランゴニ対流によって駆動される油滴分子の拡散が引き起こす、アニリン油滴の興味深い自発運動が紹介されている。油滴分子の拡散の対称性の破れによって油滴界面の表面張力のバランスがくずれ、油滴の並進運動が引き起こされている。最も興味深い点は、実験に円筒状のガラス容器を使用すると、周回運動を示すことである。つまり、ガラス容器の壁は油滴の運動において重要な効果をもつ。この新しい結果は、壁効果を利用し、油滴の運動をコントロールできる可能性を示している。著者は、この自発運動に対する数学的なモデルを構築し、油滴運動の本質的な性質を再現している。

第3章では、非平衡溶液フィルムにおける動的迷路パターンの新しい実験を提示している。迷路を形成している接触線の自発運動に伴う、迷路パターンの動的な形態変化が観測される。この動的迷路パターンは、従来報告されてきた迷路パターンでは見られない、形状が自動復帰する振る舞いを示す。パターンの時間発展は拡散過程によって支配されており、流れのないガラス容器の壁の効果、慣性の効果、接触線近傍の化学非平衡性、空気／水界面における活性アルコールの空気中への蒸発、及び水溶液への溶解が、パターン形状の時間発展に寄与している。著者はこのパターンの形態発展を説明するために、曲率に駆動された幾何学的なモデルを提案している。パターンの動的挙動は、このモデルに基づいた、数値シミュレーションにより再現されている。本論文の動的迷路パターンのモデルは、動的パターン形成を理解するためのモデルとして、新規性があり、かつ、重要であると考えられる。

第4章では、第3章で示された動的迷路パターンの界面荒さの時間発展に対し、2次元の曲率に駆動された界面の時間発展粗視化過程を仮定し、新しい動的スケールング則を数値シミュレーションで示している。この数値シミュレーション結果は、

実験結果と一致している。また、この現象における、界面荒さのスケーリング則は KPZ モデルによる従来の予測とは異なっていることをも明らかにしている。

上記の結果に基づき、本学位論文は、高い独創性を伴う、新規的でかつ重要な結果を示していると考えられる。よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 21 年 12 月 25 日論文内容とそれに関連した口頭試問を行った。その結果合格と認めた。

要旨公開可能日： 年 月 日以降