

論文審査の結果の要旨

氏名 深井洋佑

本論文は4章からなる。第1章はイントロダクションであり、界面が揺らぎながら成長する非平衡過程でのスケール不変性と非平衡普遍クラスを実例と共に議論し、その過程を記述する現象論的な Kardar-Parisi-Zhang (KPZ) 方程式を導入している。KPZ 方程式で記述される非平衡普遍クラスは KPZ クラスと呼ばれ、いくつかの厳密解が導出されており、枯草菌コロニーの成長過程や電気メッキの過程などの様々な界面成長過程が KPZ クラスで統一的に理解できることが知られている。第1章では KPZ クラスの導入に加えて、KPZ 方程式が熱伝導方程式やバーガース方程式と関連付けられることを示し、輸送現象においても KPZ クラスが存在しうる可能性を指摘している。1 + 1 次元の KPZ 不変クラスが界面の初期条件に依存していることが知られているが、この普遍サブクラスを決定する要因は詳細には解明されておらず、その実験的・理論的解明が本論文の主題の一つである(第2章)。さらにランジュバン方程式を用いて Directed Percolation (DP) クラスと総称される普遍的な臨界現象を数値的に調べ、DP クラスと KPZ クラスの遷移関係を明らかとしている(第3章)。

第2章は実験的及び理論的な手法を用いて KPZ サブクラスの決定要因を調査した研究について述べられている。近年、1 + 1 次元の KPZ 普遍クラスに属するいくつかのモデルの厳密解や、液晶電気対流を用いた実験において、ゆらぎ分布関数などの性質が、界面の初期条件に依存するということが明らかとなっている。例えば、直線から成長する界面(直線界面)と、一点から成長する界面(円形界面)では、異なる普遍的なゆらぎ分布・空間相関関数を示す。これは KPZ 普遍クラスが初期条件に依存する「サブクラス」に分類できることを示唆している。第2章では普遍サブクラスの決定要因を明らかとするために、直線界面・円形界面の中間と考えられる有限曲率初期条件からの成長過程を液晶電気対流による実験研究とクラスター成長モデル(Eden モデル)を用いた数値シミュレーションの両面から調べた。実験ではホログラフィックレーザー法を用いてネマティック液晶セルに円周形の光を照射して位相欠陥を発生させた状態(DSM2)を円周形で生成し、そこに電場を印加することで対流を生じさせ、DSM2 の界面成長過程を追跡した。ホログラフィックレーザー法による任意形状の光照射装置は論文提出者が独自に開発したものである。実験と Eden モデルの解析の結果、正の有限曲率初期条件(円周の外側成長)のもとでは、ゆらぎ分布関数等が直線界面サブクラスから円形界面サブクラスへの遷移を示すこと、その典型的な時間は曲率が小さくなるにつれて長くなることが分かった。一方、負の有限曲率初期条件(円周の内側成長)のもとでは、曲率の大小にかかわらず直線界面の属するサブクラスの性質しか見られなかった。これは単に曲率の有無がサブクラスを決定するわけではないことを示唆している。さらに Quastel と Remenik により提案された変分手法を用いて有限曲率初期条件のもとでのゆらぎ分布関数等の解析を行い、漸近的なゆらぎがリスケールされた時間 τ で記述可能であること、また局所的に放物線

初期条件を持った任意の界面の漸近挙動も同じ振る舞いをすることを示し、実験・理論の両面から有限曲率初期条件での **KPZ** サブクラスの詳細を初めて明らかとした。

第3章では2次元の **Directed Percolation (DP)** クラスの普遍的な臨界現象を調べるためにランジュバン方程式を数値的シミュレーションによって解析し、**DP** クラスと **KPZ** クラスの遷移関係について述べている。伝染病や細胞のシグナル伝達などに見られる吸収状態転移は非平衡固有の相転移現象として研究されており、多様な数値モデルが転移点において **DP** クラスと総称される普遍的な臨界現象を示すことが数値的・理論的に知られている。また、実験的にも竹内等によってネマティック液晶の解析から **DP** クラスの存在が信頼性を持って確認されている。しかし **KPZ** クラスといかなる関係にあるのか詳細は明らかとなっていない。そこで論文提出者はまず **2D-DP** ランジュバン方程式の理論的な解析に基づき、臨界点から十分に離れた領域では **KPZ** クラスで記述される揺らぎが期待されることを示し、さらに **DP** 転移点近傍での関係を明らかにするため、**2D-DP** ランジュバン方程式の数値シミュレーションを行った。シミュレーションで得られた高さ分布の解析より、**DP** クラスは十分な時間発展の後に **1+1** 次元の **KPZ** クラスへ遷移することを見出し、**DP** 及び **KPZ** 領域でのスケーリング変数間の関係式を推定した。また第4章ではまとめと将来展望を述べている。

以上、本論文は非平衡現象である界面成長のスケール不変性と非平衡普遍クラスを実験と理論の両面から定量的に明らかにしたものであり、界面成長現象の物理的理解に大きく寄与するものである。

なお、本論文第2章は東京大学大学院理学系研究科・竹内一将氏と、また第3章は東京大学物性研究所・玉井敬一氏、東京大学大学院工学系研究科・山口裕樹氏、東京大学大学院理学系研究科・平岩徹也氏との共同研究であるが、論文提出者が主体となって分析及び検証を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断される。

したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。