

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	
Title(English)	Nonequilibrium phase transitions in driven vortex matter: the reversible-irreversible transition, dynamical ordering, and Kibble-Zurek mechanism
著者(和文)	前垣内舜
Author(English)	Shun Maegochi
出典(和文)	学位:博士(理学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12314号, 授与年月日:2023年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:大熊 哲,藤澤 利正,平原 徹,賀川 史敬,村上 修一
Citation(English)	Degree:Doctor (Science), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12314号, Conferred date:2023/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第	号	学位申請者氏名	前垣内 舜	
論文審査 審査員		氏名	職名		
	主査	大熊 哲	教授	村上 修一	教授
	審査員	藤澤 利正	教授		
		平野 徹	教授		
	賀川 史敬	教授			

論文審査の要旨 (2000 字程度)

ランダムなピン止めポテンシャルの下で相互作用する多粒子系に、交流せん断力や直流駆動力を印加すると、運動による秩序化（動的秩序化）に起因する可逆-不可逆転移（RIT）や非平衡ディピニング転移といった新規な非平衡相転移や多彩なフロー構造の変化が起こることが報告されている。しかし、理論と比べ実験は進展が遅く、非平衡相転移の基本的性質や相転移の存在自体さえも明確に検証した実験は少なく、その解明が待たれている。本研究は相互作用する 2 次元多粒子系とみなせる超伝導渦糸系を用いて、動的秩序化に伴うフロー構造の変化や非平衡相転移の臨界現象を、独自に開発した動的な輸送測定を用いて明らかにすることを目的とする。

本論文は「Nonequilibrium phase transitions in driven vortex matter: the reversible-irreversible transition, dynamical ordering, and Kibble-Zurek mechanism」と題し、8 章から構成される。

第 1 章「Introduction」では、まず、本研究の背景となる多粒子系で観測される非平衡相転移である RIT や吸収状態転移、直流駆動による動的秩序化、及び本研究で実証を試みる Kibble-Zurek (KZ) 機構について過去の研究例を紹介している。つぎに、渦糸系がこれらの非平衡現象を調べるための適した実験系となることを説明し、研究目的を述べている。

第 2 章「Experimental」では、本研究で用いるランダムで弱いピン止めをもつアモルファス $\text{Mo}_x\text{Ge}_{1-x}$ 膜試料の作製法とその基本的特性について説明した後、渦糸ダイナミクスを調べるための電圧の過渡現象測定、及び本研究で開発した交差駆動法と横方向の秩序を検出できる横モードロック共鳴法について測定法を述べている。

第 3 章「Effects of the velocity on RIT and the energy landscape model」では、交流せん断速度が RIT に及ぼす効果を調べることは、RIT の普遍性とエネルギー地形モデルが動的な RIT へ適用できる可能性を示す上で重要であると意義を述べた後、観測された RIT の臨界現象は速度に依存せず常に吸収状態転移の 2 次元 Directed Percolation (2D DP) 普遍クラスに属すると報告している。一方、可逆相の広さは低速域で広がることを見出し、この結果は衝突モデルとエネルギー地形モデルの両方で説明できると結論している。

第 4 章「Critical behavior of RIT driven by particle density as well as shear amplitude」では、異なる駆動変数で相転移を起こした場合、同じ臨界現象が観測されるか否かは非自明であること、したがって、従来行われてこなかった粒子密度を変数とした RIT の実験が重要であると述べている。そこで、せん断振幅に加え、渦糸密度を変数とした RIT の実験を行った結果、共に同じ 2D DP の臨界現象を観測したと報告している。さらに、可逆相の中に粒子間の衝突を伴わない相と衝突を伴う相の 2 相が存在し、同一の臨界現象を示すこと、そして、これが最近の理論で予想されているポイント可逆とループ可逆の状態を初めて実証したものと述べている。

第 5 章「Moving smectic phase and transverse mode locking in driven vortex matter」では、まず、直流駆動された多粒子系で横方向のみの秩序をもつスメクチックフローを運動状態で観測した実験はないことを指摘している。つぎに、交差渦糸駆動法を用いた過渡電圧測定から、駆動電流の増加と共に乱れたプラスチックフローからスメクチックフローへの変化を捉え、さらに横モードロック測定から、スメクチックフローを初めて明確に観測したと報告している。

第 6 章「Evidence of second-order transition and critical scaling for the dynamical ordering transition」では、直流駆動された多粒子系で、異なるフロー状態間の変化が相転移であることを明確に示した実験は申請者の知る限りなく、プラスチックからスメクチックフローへの変化が非平衡相転移であることの実証が重要であると指摘している。2 次の平衡相転移である渦糸グラス-液体転移の検証で用いられてきた電流-電圧測定の手法を、駆動状態において横

方向に適用することにより、プラスチックからスメクチックフローへの変化が 2 次の非平衡相転移である強い証拠を初めて得たと述べている。

第 7 章「Kibble-Zurek mechanism for the dynamical ordering transition」では、KZ 機構は長年盛んに実証実験が行われてきたが、専ら温度低下による平衡相転移に限られたこと、したがってプラスチックフローからスメクチックフローへの非平衡転移が 2 次の無秩序-秩序転移であることを利用し、KZ 機構の検証を目指すという目的を述べている。本実験で相転移点を横切る駆動電流の増加速度と生成された欠陥密度の間にべき乗則が成り立つこと、さらに、臨界緩和を直接捉えた実験結果も見出したことにより、非平衡相転移にも KZ 機構が適用できることを初めて実験で示したと結論している。さらに、この相転移が吸収状態転移の 1D DP クラスに属することも見出したと報告している。

第 8 章「Conclusions」では、本研究で得られた結果をまとめ、将来展望を述べている。

以上の通り、本論文は新たに開発した動的実験手法を渦糸系に適用することにより、交流駆動による RIT、及び直流駆動による動的秩序化に伴う渦糸フロー状態の変化が、いずれも共通の非平衡相転移で記述できることを示したこと、さらに KZ 機構が非平衡相転移にも適用できることを初めて実験で示したもので、超伝導分野のみならず広い分野へ波及する重要な業績と考えられる。したがって、本論文は博士（理学）の学位論文として十分な価値があるものと認められる。

注意：「論文審査の要旨及び審査員」は、東工大リサーチポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。