

平成 21 年 6 月 5 日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2007～2008

課題番号：19740227

研究課題名（和文） ランダムポテンシャル中を駆動される超伝導磁束格子の動的相図

研究課題名（英文） Dynamical phase diagram of flux line lattices  
driven in random potential

研究代表者

能川 知昭（NOGAWA TOMOAKI）

東京大学・大学院工学系研究科・特任研究員

研究者番号：00399982

研究成果の概要：

本研究では不純物等によるランダムなピン止めが存在するときの超伝導磁束格子の併進ダイナミクスを数値シミュレーションによって調べた。流体的なふるまいと固体的なふるまいを同時に扱えるシンプルな格子場のモデルを考案し、ピン止め強度や駆動力などのパラメータに対し駆動状態がどのように変化するかを検証した。

2次元系においてシミュレーションを行った結果、ピン止めが駆動力に対して相対的に弱いときには、磁束渦糸が結晶化したままの比較的スムーズなスライド運動が観測された。一方ピン止めが駆動力に対して強い時には不均一で流体的な運動が観測された。このときピン止めの強い部分領域は静止したまま、そこを迂回するような流れ場が形成された。これは結晶を破壊しながら進む塑性流動とみなせ、間欠的で遅いダイナミクスである。この2種の運動状態の間には特異性を伴う相転移はおこらないが、流動性が大きく成長する特徴的なクロスオーバーが存在する。磁束格子の移動のしやすさは超電流に対する散逸の大きさを意味するので、流体的状態は電気抵抗の低い超伝導に準ずる状態、固体的状態は散逸の大きい常伝導状態といえる。

上記のような粗視化モデルの妥当性を考察するため磁束渦糸を直接取り扱うことのできるXYモデルによるシミュレーションも行った。渦糸の拡散ダイナミクスは履歴効果を伴う異常拡散であること、渦糸の密度が高い時、結晶異方性によって不純物がなくてもピン止めが起こり、その性質は粉体系のレオロジーで見られるジャミング転移と共通の側面を持っていることなどがわかった。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	700,000	0	700,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,300,000	180,000	1,480,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：数理物理・物性基礎

キーワード：不規則系

## 1. 研究開始当初の背景

本研究で取り組むのは結晶など空間秩序を形成する協力的な相互作用と、その秩序を妨げる弱いランダムポテンシャルが競合する系の輸送ダイナミクスである。現実の物質では、不純物や格子欠陥などの乱れを完全に排除することは不可能であるから、これは極めて普遍的な問題である。実際、電荷密度波、超伝導磁束格子、コロイド結晶などの多様な系でこの側面の研究が行われている。これらの系に関しては熱平衡状態での静的な秩序について長い研究の歴史があるが、外力によって駆動される非平衡(定常)状態における秩序にも近年注目が集まりつつある。

超伝導体に超電流を流すとローレンツ力の反作用として磁束格子に駆動力としてはたらく。この系は駆動力の大きさによって多様な形態の運動状態を示すことが知られており、温度、磁場の熱力学パラメータに駆動力を加えた動的な相図に関心が集まっている。磁束渦系が外力を受けて運動すると、エネルギー散逸、すなわち有限の抵抗を生じてしまうが、不純物によって渦系格子をピン止めされることで超伝導を保持することができる。実用上望まれるのは、大きな電流を流しても超伝導状態であり続ける材料物質であるから、不純ピン止めの効果は工学的に非常に重要である。抵抗が生じたあとも直ちに常伝導状態になるわけではなく、ピン止め領域と流動領域が共存する塑性流動や、間欠的な流動を示すクリープ状態、一様なスライディング状態など多様な運動状態を経る。このような変化は駆動力と共に運動速度が速くなったときに不純物効果が有効的に小さくなり、時間・空間的に均質なダイナミクスへ移行するためと理解されている。このとき生じる空間秩序は駆動のない静的な場合のものと同質だと予想されているが直接的に示されてはいない。さらにこの遷移において相転移があると信じられているが平衡状態の相転移とのアナロジーが通用するような臨界現象であるのかという本質的な問題にも未だ答えが与えられておらず、理論的な説明が待たれている。

## 2. 研究の目的

先に述べた駆動された非平衡状態における転移に関しては分子動力学シミュレーションによる研究が多くなされており、実験事実を定性的にある程度再現するものの、臨界領域の特異的な振る舞い、1次転移、2次転移、あるいはクロスオーバーなのかなどについては物理的な猫像を得るに至っていない。本研究では統計力学的な縮約モデルに基づくシステマティックな数値解析によってマクロな系の運動状態をミクロなダイナミクスから理解することである。さらに複数ある運動状態の間で予想されている相転移の臨界的な性質を明らかにすることを目的とする。また、その結果として、温度、ランダムネス、駆動力のパラメータに対する相図が得られる。転移の詳しい性質を解明した上で実験において注目すべき点や物理量を提案してゆく。

## 3. 研究の方法

不純物等によるランダムなピン止めが存在するときの超伝導磁束格子の併進ダイナミクスを数値シミュレーションによって調べた。この目的のため、流体的なふるまいと固体的なふるまいを同時に扱えるシンプルな格子場のモデルを考案した。これは磁束渦系の(粗視化された)変位ベクトル(場)を自由度として、渦系密度の圧縮、膨張のエネルギーと降伏応力を導入したものである。結晶化を促す相互作用の強さ、ピン止めの強さ、外部駆動力の大きさという3つのパラメータに対し駆動状態がどのように変化するかを検証した。

磁束渦系は本来、超伝導凝縮状態の位相に関する特異点である。上記の粗視化モデルの基礎づけとして、この位相場を直接記述する2次元XYモデルを用いて渦系のミクロなダイナミクスも調べた。渦系密度の希薄なときの拡散現象、高密度なときの流動性について数値シミュレーションによる検証を行った。

#### 4. 研究成果

2次元系において粗視化モデルのシミュレーションを行った結果、ピン止めが駆動力に対して相対的に弱いときには、空間的に一様でスムーズな併進運動が観測された。これは磁束渦糸が相対的な位置関係を保持したままスライドしていることを意味しており、固体的な運動と呼ぶことができる。しかし相互作用が強くても結晶的な長距離秩序は見られなかった。これは低次元(2次元)性からくるものと考えられる。一方ピン止めが駆動力に対して強い時には不均一な運動が観測される。ピン止めの強い一部の領域は静止しており、そこを迂回するような流れ場が形成された(図1参照)。これは固体の塑性流動を表している。このような2つの運動状態の間には特異性を伴う相転移はおこらないが、外力に対する渦糸の応答・運動性が著しく成長するシャープなクロスオーバーが存在する。流体的状態の運動は間欠的かつ緩慢で、固体的状態に比べ移動度は極めて低い。磁束格子の流動性は超電流に対する散逸の度合を意味するので、このクロスオーバーは抵抗の低い状態と高い状態を隔てるものである。



図 1. 塑性流動の不均一な流れ場を矢印で表した  
もの。明るい(白い)ものほど強い流れを示す。

上記のような粗視化モデルの妥当性を考察するため磁束渦糸を直接取り扱うことのできる XY 模型によるシミュレーションも行った。渦糸が希薄で相互作用を無視した場合の渦糸の拡散ダイナミクスは履歴効果を伴う異常拡散であることが分かった。これは渦糸は単純な糸(2次元では点)ではなく周囲の場を引きずる高次の構造体であることを意味する。

また、frustrated XY モデルによるシミュレーションの結果、磁束渦糸の密度が高い時には、超伝導相互作用の結晶方向に関する異方性によって、不純物がなくてもピン止めが起こることを見出した。さらにこの現象は粉体系で見られるレオロジーで見られるジャミング転移と共通の数理的側面を持っていることがわかった。この問題は実用、理論の両面で興味深く今後のさらなる研究が必要である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計5件)

- 1) Tomoaki Nogawa and Koji Nemoto, "Abnormal diffusion of single vortex in two-dimensional XY model", Journal of Physics Society of Japan, 査読あり、vol. 78 (2009) p. 064001(1-6).
- 2) Hajime Yoshino, Tomoaki Nogawa and Bonsoo Kim, "Vortex jamming in superconductors and granular rheology", New Journal of Physics, 査読あり、vol. 11 (2009) p. 013010(1-14).
- 3) Tomoaki Nogawa, Koji Nemoto and H. Yoshino, "Spatio-temporal scaling for out-of-equilibrium relaxation dynamics of an elastic manifold in random media: crossover between the Larkin regime and thermally activated regime", Physical Review B, 査読あり、vol. 77 (2008) p. 064207(1-7).
- 4) Tomoaki Nogawa and Koji Nemoto, "Melting transition of vortex lattice in uniformly frustrated XY model with quasi-one- and quasi-two dimensional anisotropy", Journal of Physics : condensed matter, 査読あり、vol. 19 (2007) p. 145207-145212.
- 5) Tomoaki Nogawa and Koji Nemoto, "Charge density wave state in topological crystal", Topological

Aspects of Critical Systems and Network (World Scientific Publishing), 査読あり、(2007) p. 245-248.

[学会発表](計7件)

- 1) 吉野元、「磁場中ジョセフソン接合配列における磁束のジャミング転移」、日本物理学会、2009年3月27日、於立教大学.
- 2) Tomoaki Nogawa, “Numerical study of Multiple Phase Transitions on Nonamenable Graphs”, International Conference on Complex Network, 2008年12月19日、於ソウル大学.
- 3) Tomoaki Nogawa, “Out-of-equilibrium dynamics of a three dimensional elastic manifold in random media”, 日仏セミナー「Frontiers of Glassy Physics」、2008年11月21日、於京都大学基礎物理学研究所.
- 4) 能川知昭、「Josephson 結合配列における結合異方性の効果」、日本物理学会、2008年9月21日、於岩手大学.
- 5) 能川知昭、「2次元XYモデルの渦血管の異常拡散」、日本物理学会、2008年3月25日、於近畿大学.
- 6) 能川知昭、「ランダムポテンシャル中の弾性多様体の次空間スケーリング」、日本物理学会、2007年9月24日、於北海道大学.
- 7) Tomoaki Nogawa, “Nonequilibrium relaxation dynamics in the three dimensional random manifold XY model”, The 24th International Conference on Statistical Physics, 2007年7月12日、於イタリア・ジェノヴァ.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

能川知昭 (NOGAWA TOMOAKI)

東京大学・大学院工学系研究科・特任研究員

員

研究者番号：00399982