様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科研費 KAKENHI

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成 ３０ 年　 ６ 月 １５ 日現在

機関番号：１２６０８
研究種目：挑戦的萌芽研究
研究期間：2015～2017
課題番号：１５Ｋ１３５１６

研究課題名（和文）渦糸運動の高精度制御・観測法の開発と非平衡科学への適用

研究課題名（英文）Development of precise control and observation of vortex motion and their application to non-equilibrium science

研究代表者
大熊　哲（Okuma, Satoshi）

東京工業大学・理学院・教授

研究者番号：５０１９４１０５

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　2,900,000円

研究成果の概要（和文）：傾斜磁場下に置いた超伝導膜にモードロック共鳴法を適用することにより，通常の固体では実現できない異方的渦糸格子を創成し，高速駆動された状態での渦糸密度増大に伴う動的融解現象を調べた。その結果，異方的格子の融解は格子形状によらず短い辺の長さだけで決まることを見出した。一方，乱れた初期配置をもつ渦糸系を交流駆動させると徐々に秩序化する。2段階の電圧過渡応答測定法を開発することにより，この動的秩序化途中の渦糸配置は乱れた領域と秩序領域が相分離し，サイクルの数と共に秩序領域の割合が増大することを見出した。

研究成果の概要（英文）：By preparing anisotropic vortex lattices, which cannot be realized in ordinary solids, under an applied field tilted from the normal to the plane of a superconducting film, we study a dynamic-melting phenomenon of the fast driven lattices associated with an increase in the vortex density, using a mode-locking technique. The results show that a melting condition of the anisotropic lattices is determined only by the shorter side of the distorted lattices regardless of the shape of the lattices. In contrast, vortex assemblies with disordered initial configuration become gradually ordered under the application of ac drive. By developing two-step measurements of transient voltage responses, we find that the vortex configuration during the dynamic ordering is separated into disordered and ordered regions and that the ratio of the disordered region increases with the number of cycles.

研究分野：数物系科学

キーワード：超伝導渦糸　非平衡ダイナミクス　動的相転移　プラスチックフロー　動的融解　異方的格子　自己組織化　せん断力

１．研究開始当初の背景

第 2 種超伝導体に垂直に磁場を印加すると量子化された磁束が渦糸の形で侵入する。電流により渦糸は駆動され速度に比例した電圧を生じるため，渦糸ダイナミクスの研究は超伝導の応用上重要である。一方，渦糸は互いに斥力相互作用を及ぼし合い，温度，磁場，ピン止め力を変えることにより，渦糸格子，グラス，液体といった多彩な静的状態や運動で誘起される相転移－動的相転移－を発現する。我々は渦糸を粒子とみなすことにより，(i) 渦糸格子が歪み力(shear)によって駆動されたときに起こる固体のプラスチックフロー現象や，(ii) ランダムポテンシャル中を相互作用しながら駆動される多粒子系の動的秩序化や動的相転移といった，普遍的な物理現象解明のための実験系として渦糸系を利用している。例えば (i)については，直流に交流を重畳させたモードロック(ML)共鳴の手法を用い，運動によって秩序化した渦糸格子のフロー状態の検出とその融解現象－動的融解－を，(ii)については，直流駆動による非平衡 depinning 転移，交流 shear による乱れた初期配置の秩序化－ランダム組織化－や可逆不可逆転移といった新奇非平衡現象や非平衡相転移現象を見出してきた。

ところで，渦糸の配置や相互作用に大きな異方性が存在する場合，上記の現象がどのように変わるか，例えば，異方的な格子の融解条件はいかなるものかは興味がもたれる。あるいは，上記の非平衡現象の過程で渦糸配置がどのように時間発展していくかも，非自明な基本的重要問題である。

２．研究の目的

本研究では，異方的格子をはじめとする多彩な配置をもつ渦糸系を創成すると共に，そのダイナミクスを高精度に制御し観測するための実験手法を確立させ，多粒子系の非平衡物理の実験を大きく進展させることを目的とする。本稿では，得られた複数の成果の中から，(i) 大きな異方性をもつ渦糸格子の動的融解現象，および (ii) 交流駆動によるランダム組織化に伴う渦糸配置の時間発展に関する成果を紹介する。(i)では基本的な物理現象のひとつである固体の融解，特に通常の原子固体では実現できない大きな異方性をもつ格子固体の融解条件を，(ii)ではやはり普遍的現象のひとつである乱れた多粒子系の運動による秩序化を扱い，可逆-不可逆転移（後述）の素過程ともいえる，交流駆動力印加後の粒子配置の時間発展を明らかにする。

３．研究の方法

(1) 高速フロー運動する渦糸系の格子性，すなわち運動方向の格子定数を検出するため，高周波（パルス）ML共鳴法を開発し，用いた。

(2) 様々な非平衡現象や非平衡相転移の臨界現象を観測するため，駆動された渦糸系の発生する電圧の過渡応答を測定するシステム，特に試料内の渦糸配置に関する情報を得るための，入力と読み出しの2段階の過渡電圧応答測定を組み合わせた新規測定法を開発した。

(3) 並行して，高速フローする渦糸格子の実空間・実時間測定を行うための点接触分光装置の試作を行った。格子運動を実時間で捉える周期信号の検出には至っていないが，アンドレーフ反射を観測し，定常状態における渦糸運動の有無の検出が可能となった。

(4) 弱くランダムなピン止めポテンシャルもつアモルファスMo_xGe_{1-x}膜をスパッタリング法で作製した。研究目的に応じて，矩形・円盤・円錐等の形状と電極配置をもつ試料を準備した。また傾斜磁場を有効に活用した。

４．研究成果

(1) 異方的渦糸格子の動的融解

超伝導体の表面に垂直磁場を印加すると等方的な Abrikosov 格子が形成される。磁場を垂直方向から θ だけ傾けると，傾斜方向に 1/cosθ だけ引き伸ばされた異方的な格子が現れる（図 1(b)と(c)）。このような異方的な格

子の融解条件がどのようなものかは非自明である。渦糸格子の融解はリンデマン則で支配される。その研究は一般の固体の融解現象の理解にもつながるが，通常の固体では格子に大きな異方性を導入することはできない。そこで本研究では，傾斜磁場下（$\theta=36°$）では大きな異方性をもつ格子を創成できることを利用した。さらにそれを電流駆動させることによって基板のピン止めポテンシャルと decouple した状態を実現させ，異方的渦糸格子の固有の動的融解を ML 共鳴法によって調べた。融解は印加磁場を増大させ，渦糸間距離を減少させることにより実現した。

図 1(d)-(g)は(a)-(c)に示した渦糸格子の ML 共鳴信号の磁場依存性である。すべての渦糸格子について，ある磁場以上で ML 共鳴が消失し，動的融解が起こっていることがわかる。縦の実線は三角格子の 1 辺がフロー方向に垂直な垂直方位を，破線は平行方位を表す。

図2の黒のシンボル（四角）は垂直磁場下における等方的渦糸格子，青と赤のシンボルは挿入図に示す2種類の異方的渦糸格子の動的融解磁場をML共鳴周波数の逆数，すなわちMLにおける並進速度の逆数に対してプロットしたものである。外挿した直線が横軸と交わる点が，速度無限大の極限における動的融解磁場を表す。挿入図の矢印はフロー方向を示す。傾斜磁場方向にフローさせる場合（青色）にはLattice Aの動的融解が観測された。

これに対し，渦糸格子を傾斜磁場に垂直な方向にフローさせる場合(赤色)は，フロー速度を上げていくと Lattice A から B への変化が起こり，動的融解磁場が不連続に減少する（赤丸）。しかし Lattice A と B のいずれの場合も，融解は短い辺 a_s が等方的格子の融解時の辺 a_c に一致するときに起こることがわかった。

以上の実験結果をもとに，各渦糸格子が融解する直前の様子を図 3 に模式的に描いた。等方的格子(a)が融解するときの辺の長さを赤い辺で表す。つまり Lattice A の動的融解は，(b)の斜めの赤い辺 a_s が，等方的格子の動的融解が起こるときの辺 a_c と一致するときに，Lattice B の動的融解は，(c)の水平な辺 a_s が a_c と一致するときに起こることがわかる[7]。

さらに詳しく調べると，Lattice B では a_s が等方的格子の融解する辺 a_c の長さをわずかに下回ったときに融解が起こることがわかっ

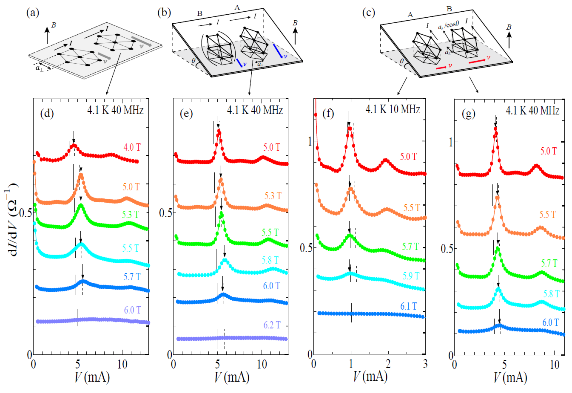

図 1　(a-c) 渦糸格子の形状とフロー方位．(d-g) (a)から(c)に示した各渦糸格子における ML 共鳴の磁場依存性．縦の実線と破線は，それぞれ垂直方位と平行方位を表す[7].

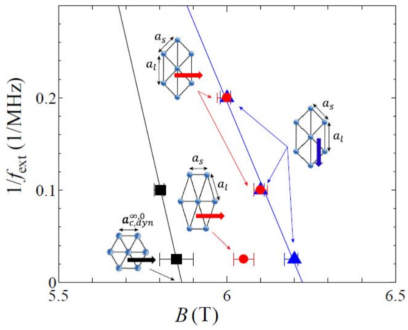

図 2　等方的（黒四角）および異方的（青と赤シンボル）渦糸格子の動的融解磁場対 ML 周波数（並進速度）の逆数．挿入図の矢印はフロー方向を示す[7].

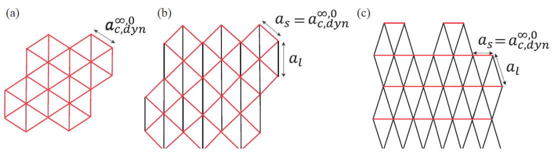

図 3　等方的および異方的渦糸格子の動的融解の模式図．赤い辺が，等方的格子(a)が融解するときの辺の長さを表す[7].

た。このことは Lattice B の融解が 2 段階に起こっている可能性を示唆する。

(2) ランダム組織化に伴う渦糸配置の時間発展

渦糸系は，互いに反発力を及ぼし合う極めて均質な 2 次元多粒子系とみなせる。直流，交流，および直流・交流重畳電流を流すことにより，多彩な駆動力を印加できる。試料中に含まれるランダムな欠陥は渦糸に対する引力源となり，渦糸のスムーズな運動を阻害するランダムポテンシャルとなる。渦糸系では，ランダムな基板の下で制御された駆動力を印加し，速度応答を誘導電圧によって精度よく測定できることから， 新しい非平衡現象や非平衡相転移を調べるための格好の実験系となる。

これまでに我々は，交流矩形電流により渦糸系に周期的せん断力を印加することによって，乱れた初期配置の渦糸が衝突をくり返しながらしだいに組織化していく，運動による秩序化現象－動的秩序化－を観測した。これはランダム組織化とも呼ばれる。さらに，交流のせん断振幅 d をパラメタとすることにより，各サイクル後にすべての粒子が元の配置に戻る可逆相から，戻らなく粒子が存在する不可逆相への非平衡相転移である可逆-不可逆転移が起こることをコロイド系について示した。

これに対し，比較的秩序のある初期渦糸配置に小さい直流駆動力を印加すると，運動する渦糸系が徐々にピン止めに捕まり，最終的にはプラスチックフローと呼ばれる空間的・時間的にゆらいだ乱れたフロー状態へと向かう。これは運動に伴って秩序が失われていく動的無秩序化あるいは動的ピニング現象と呼ばれる。我々は駆動力の大きさをパラメタとして，すべての粒子（渦糸）が静止した pinned 相から，一定数の運動する渦糸が存在する depinned 相への非平衡ディピニング転移が起こることを，臨界緩和の観測により初めて実証した。このように，渦糸系の実験により非平衡相転移の研究が大きく進展したが，これらの素過程ともいえる粒子配置の時間発展の様子は，渦糸系を含むどの系でもまだ明らかにされていない。

そこで本研究では，渦糸配置に関する情報を得るため，交流駆動された渦糸運動によって発生する電圧の過渡応答をプローブとする，“入力” と “読み出し” の 2 段階実験の方法を開発した[2]。実験は可逆-不可逆転移点（$d_c = 0.1$ μm）に近い不可逆相で行った。したがって，駆動振幅 d が大きいほど，より乱れた終状態をとることに注意する。

図 4 の上段のグラフは，乱れた初期配置をもつ渦糸系に駆動振幅 $d_{inp} = 3$ μm の交流駆動力を印加したときの過渡電圧応答（平均速度の時間依存性）である。これを入力実験と呼ぶ。時間と共に電圧振幅の増大と定常状態へ向かう緩和現象が見られる。これは動的秩序化を表す。4 種類の交流サイクル数 $n = 0$, 10, 40, ∞で一旦駆動力を切って渦糸配置を凍結した後，入力実験とは異なる交流駆動振幅

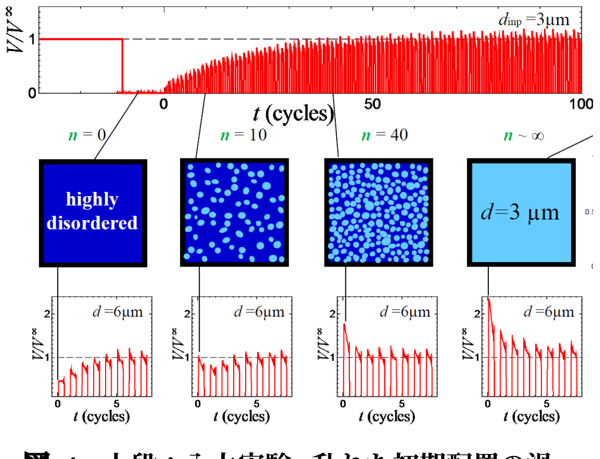

図 4　上段：入力実験．乱れた初期配置の渦糸系に d_{inp} = 3 μm の交流駆動力を印加したときの過渡電圧応答．途中の n で運動を凍結．下段：読み出し実験．凍結させた上記配置に $d = 6$ μm の交流駆動力を印加したときの電圧応答． 中段： 読み出し実験から予想される，凍結させた渦糸配置の模式図．薄い青色ほど秩序ある配置を表す[2].

d = 6 μm で交流駆動させたときの読み出し電圧波形を下段の 4 つのグラフに示す。この電圧波形を解析した結果，入力実験の動的秩序化の過渡状態では系は微視的に一様でなく，秩序相と無秩序相が分離し共存すること，そして交流駆動のサイクルの回数 n を増やしていくと，秩序相の割合が 0 から 1 に単調に増加することが明らかになった。その様子を図 4 の中段に模式的に示した。薄い青色がより秩序化された配置を表す。この 2 相共存状態は，理論でも予想されていなかった新規な現象である[2]。その起源の解明が待たれる。

(3) まとめ

世界的に見ても極めてユニークな高周波輸送現象測定であるML共鳴法に加え，本研究で新たに開発された2段階の電圧過渡応答測定[2]を，多彩な渦糸系に適用することにより，新しい非平衡現象・非平衡相転移を見出すことに成功した。上に紹介したテーマの他にも，多くの成果を得た[1, 3-6]。本研究の成果は，コロイド粒子，電荷密度波，磁壁運動，格子欠陥，アモルファス物質，スカーミオン，ジャミング粒子，アクティブマターなどの様々な研究分野の研究を促すものと期待される。

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 7 件）

(1) Y. Kawamura, S. Moriya, K. Ienaga, S. Kaneko, and S. Okuma, "Nonequilibrium depinning transition of ac driven vortices with random pinning" New J. Phys. 19 (2017) 093001(1-8);10.1088/1367-2630/aa819d 査読有

(2) M. Dobroka, Y. Kawamura, K. Ienaga, S. Kaneko, and S. Okuma, "Memory formation and evolution of the vortex configuration associated with random organization" New J. Phys. 19 (2017) 053023 (1-11); https://doi.org/10.1088/1367-2630/ aa6ad8 査読有

(3) N. Sohara, A. Ochi, E. Murakami, K. Ienaga, S. Kaneko, N. Kokubo, and S. Okuma, "Vortex states near absolute zero in a weak-pinning amorphous Mo_xGe_{1-x} film probed by pulsed mode-locking resonance" J. Phys.: Conf. Ser. 871 (2017) 012022(1-8); 10.1088/1742-6596/871/1/ 012022 査読有

(4) K. Ienaga, M. Dobroka, Y. Shirahata, Y. Kawamura, S. Kaneko, and S. Okuma, "Random organization of vortices under an anisotropic condition" J. Phys.:Conf. Ser. 871 (2017) 012020 (1-4); 10.1088/1742-6596/871/1/ 012020 査読有

(5) 大熊哲, **"超伝導渦糸格子のダイナミクスと非平衡相転移" 固体物理** 51 No. 10 (2016) 547-566 査読有; ISSN0454-4544

(6) A. Ochi, N. Sohara, S. Kaneko, N. Kokubo, and S. Okuma "Equilibrium and Dynamic Vortex States near Absolute Zero in a Weak Pinning Amorphous Film" J. Phys. Soc. Jpn. 85, No.4 (2016) 044701(1-7); https://doi.org/10.7566/ JPSJ.85.044701 査読有.

(7) A. Ochi, Y. Kawamura, T. Inoue, T. Kaji, M. Dobroka, S. Kaneko, N. Kokubo, and S. Okuma "Dynamic Melting of Driven Abrikosov Lattices in an Amorphous Mo_xGe_{1-x} Film in Tilted Field" J. Phys. Soc. Jpn. 85 (2016) 034712 (1-6); https: //doi.org/10.7566/JPSJ.85.034712 査読有.

〔学会発表〕（計 60 件）

① S. Okuma, "Nonequilibrium dynamic phases and transitions of superconducting vortices driven over random pinning" Int. Workshop on Glasses and Related Nonequilibrium Systems, Osaka Univ. 2017 (Invited talk)

② S. Okuma, "Plastic Flow and Dynamic Transitions of Vortex Solids in Superconductors" Int. Conf. on Avalanches, plasticity, and nonlinear response in non- equilibrium solids, Kyoto Univ., 2016 (Invited talk)

③ S. Okuma, "Nonequilibrium Phase Transitions in Driven Vortices" Int. Workshop on Vortex Matter, El Escorial, Spain, 2015 (Invited talk) 他

〔図書〕（計 1 件）

(1) 大熊哲（分担）
磁束系の動的相図と非平衡ダイナミクス
「超伝導磁束状態の物理」p.250-259 /**総頁数** 674 **頁 裳華房**, 2017; ISBN978-4-7853-2922-8

〔その他〕

ホームページ等

http://www.rcltp.titech.ac.jp/~okumalab/

6．研究組織

(1)研究代表者

大熊　哲（OKUMA, Satoshi）
東京工業大学・理学院・教授
研究者番号： 50194105

(2)連携研究者

金子　真一（KANEKO, Shin-ichi）
東京工業大学・理学院・助教
研究者番号： 40301171