

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 31 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21340096

研究課題名（和文） 超伝導渦糸固体の動的量子融解と新奇絶縁体相

研究課題名（英文） Dynamic quantum melting and novel insulating phase in superconducting vortex solid

研究代表者 大熊 哲（OKUMA SATOSHI）

東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：50194105

研究成果の概要（和文）：超伝導渦糸系を高速フローさせ、ピン止めを排除した極限下での渦糸格子固有の融解（動的融解）転移を観測した。低温域では動的融解磁場の温度依存性が急激に弱まり、静的融解磁場より大きく減少することを見出した。これは渦糸格子の真の量子融解転移を世界に先駆け捉えたものである。新奇絶縁体相の観測には至っていないが、関連して、フローする渦糸格子の方位が、ある臨界速度を境に回転する現象を見出した。これにより、準粒子寿命というミクロな機構が、渦糸ダイナミクスの巨視的挙動を支配することを初めて示した。

研究成果の概要（英文）：We observe intrinsic melting of fast driven vortex lattice (i.e., dynamic melting) in a superconductor in the limit of zero pinning. With decreasing temperature T , the T dependence of a dynamic melting field $B_{c,dyn}(T)$ becomes very weak and $B_{c,dyn}(T)$ is significantly suppressed compared to a static melting field. This is the first observation of a dynamic quantum melting transition. Although novel insulating phases have not yet been found, related to this issue, it has been revealed that the lattice orientation of the flowing vortex lattice rotates as the velocity exceeds a certain critical value. From this result, it has been first demonstrated that a microscopic mechanism of a quasi-particle life time dominates a macroscopic behavior of vortex dynamics.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|------------|-----------|------------|
| 2009年度 | 8,300,000 | 2,490,000 | 10,790,000 |
| 2010年度 | 4,000,000 | 1,200,000 | 5,200,000 |
| 2011年度 | 2,200,000 | 660,000 | 2,860,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 14,500,000 | 4,350,000 | 18,850,000 |

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性

キーワード：超伝導・密度波

1. 研究開始当初の背景

(1) 乱れた超伝導薄膜の2次元超伝導絶縁体

転移（SIT）直上には、絶対零度 $T=0$ で磁束渦糸がボース凝縮（BEC）（量子融解）し、ク

ーペア対が局在したボースグラス相と呼ばれる異常な絶縁体相が存在することが以前から予想されていた[Fisher, PRL 1990]。一方近年、極低温の有限温度 ($T > 0$) において、やはり渦糸が BEC し、クーバー対が局在した超絶縁体相という新しい絶縁体相が存在することが提案された[Vinokur *et al.*, Nature 2008]。これらの 2 次元絶縁体相は、いずれも乱れた電子系の新しい基底状態として大きな注目を集めている。しかし、これまでの実験は静的な電気抵抗測定に限られ、渦糸状態の観点からの情報に乏しかったため、これらの相の存在についての実験証拠はまだ得られていない。

(2) 上記の問題を解明するためには、極低温において渦糸固体の量子融解を明確に捉える実験手法を確立することが必要である。

2. 研究の目的

(1) 渦糸固体の量子融解 (3 次元および 2 次元系)、および 2 次元系の量子融解によって出現する新奇絶縁体相の実験証拠を得るため、極低温で渦糸状態を明確に捉えることのできる動的測定手法を確立する。

(2) 試料に含まれる欠陥や不純物は、渦糸固体の秩序を乱すピン止め中心として働く。本研究ではこれらのピン止めに左右されない、渦糸固体格子固有の量子融解転移を検出することを目的とする。このため、極低温下で渦糸系を高速でフローさせ試料のピン止めを排除した状態で、渦糸固体格子の量子融解転移 (動的量子融解) を捉えることを目指す。

3. 研究の方法

(1) 高周波スパッタリング法によりアモルファス $\text{Mo}_x\text{Ge}_{1-x}$ 膜を作成する。この系は、ピン止めが微視的で弱いこと、電気抵抗率が高く量子ゆらぎの効果が大きいこと、そして 3 次元から 2 次元系へ次元性が制御可能であることから、本研究には最適の系である。

(2) 渦糸の運動によって発生する通常の電圧測定に加え、渦糸系のダイナミクスをより詳細に捉えることのできる、モードロック共鳴 (MLR) および電圧ノイズ測定という、特徴ある動的測定手法を適用する。このための測定系を構築する。

(3) 駆動された渦糸系は、速度増大に伴い徐々にピン止め力を感じなくなり、乱れたフロー状態から渦糸格子の秩序が回復したコヒーレントなフロー状態へと動的に相転移する。これを動的秩序化という。この動的秩序化を検出するため、MLR 法を駆使する。

さらにこの手法により、渦糸格子の運動方向の格子定数が求められるため、フロー方向に対する格子の結晶方位を決定することができる。

(4) 動的秩序化した渦糸格子は、静的な渦糸格子のように、磁場あるいは温度上昇により融解する。これを動的融解という。特に 1 K 以下の極低温域で観測されることが期待される、量子ゆらぎに起因する動的量子融解を検出するため、希釈冷凍機内で MLR 法を用いる。

4. 研究成果

(1) 渦糸系を高速でフローさせ、ピン止めの影響を排除した極限下での渦糸格子固有の融解転移 (動的融解) を観測した。低温域では静的融解磁場の温度依存性と比べ、動的融解磁場の温度依存性が急激に弱まり、静的融解磁場より大きく減少することを見出した。これは渦糸格子の真の量子融解転移を世界に先駆け捉えたものである。

(2) この現象と関連して、フローする渦糸格子の格子方位を磁場および速度の関数として明らかにした。この駆動されたアブリコソフ格子の格子方位の問題は、30 年以上も前から理論的に議論されている基本的な重要問題であるが、これまで実験手法がなかった。

我々は適度な速度域では、渦糸格子は三角格子の一辺がフロー方向と垂直となる垂直方位をとること、ところが磁場を増大させると熱的及び量子的動的融解磁場の手前で、いずれも垂直方位から平行方位へと回転することを見出した。これは動的融解手前で渦糸系が感じるピン止め力が弱まるためと考えられる。

さらに特筆すべき成果は、垂直方位をとる磁場中で速度を上昇させると、ある臨界速度を境に平行方位へ回転すること、さらにこの臨界速度では渦糸が 1 格子進む時間が格子間距離に依らず、準粒子がクーバー対に回復する準粒子寿命とほぼ等しいことを明らかにした。運動する渦糸は超伝導が壊れた渦糸芯に引き寄せられる傾向があることを考慮すると、この結果は運動する渦糸間の引力相互作用を初めて実験的に捉えたものといえる。準粒子寿命というミクロな機構が渦糸ダイナミクスの巨視的挙動を支配することを実証したものであり、大きな物理的意義がある。渦糸ダイナミクスのシミュレーションや応用分野にも波及する成果と考えられる。

(3) 一方、2 次元系ではこれまでのところ MLR は観測されておらず、このため渦糸格子の動的融解や新奇絶縁体相の検出には至つ

ていない。この理由として、2次元系の強いゆらぎの効果により、わずかなピン止めでも渦糸格子の形成が妨げられていることを考えている。これまで多くの2次元系で渦糸格子の存在や格子の融解転移が明確に観測されてこなかったのは、このことが原因なのかもしれない。

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16件)

- (1) S. Okuma, D. Shimamoto, and N. Kokubo, Velocity-induced reorientation of fast driven Abrikosov lattice, Phys. Rev. B, 査読有, Vol. 85, 2012, 064508 (1-5).
- (2) S. Okuma, D. Shimamoto, and N. Kokubo, Dynamic ordering and lattice orientation of driven vortex matter, J. Phys.: Conf. Ser. (印刷中), 査読有, 2012.
- (3) H. Sato and S. Okuma, Absence of mode-locking resonance for driven vortices in a thin amorphous M_xGe_{1-x} film, J. Phys.: Conf. Ser. (印刷中), 査読有, 2012.
- (4) D. Shimamoto, S. Okuma, and N. Kokubo, Lattice orientation of driven vortex matter in amorphous superconducting films, J. Phys.: Conf. Ser. Vol. 302, 2011, 012027(1-4).
- (5) A. Motohashi and S. Okuma, Plastic depinning in superconducting vortices, J. Phys.: Conf. Ser., 査読有, Vol. 302, 2011, 012029(1-4).
- (6) H. Sato and S. Okuma, Mode-locking resonance for driven vortex matter in thick and thin superconducting films, J. Phys.: Conf. Ser., 査読有, Vol. 302, 2011, 012028(1-4).
- (7) S. Okuma, H. Imaizumi, D. Shimamoto, and N. Kokubo, Quantum melting and lattice orientation of driven vortex matter, Phys. Rev. B, 査読有, Vol. 83, 2011, 064520(1-7).
- (8) S. Okuma, Y. Tsugawa, and A. Motohashi, Transition from reversible to irreversible flow: Absorbing and depinning transitions in a sheared-vortex system, Phys. Rev. B, 査読有, Vol. 83, 2011, 012503(1-4).
- (9) Y. Matsumura, S. Okuma, and K. Kokubo, Rotating vortex-lattice rings in superconductors, Physica E, 査読有, Vol. 43, 2010, 707-710.
- (10) S. Okuma, Y. Yamazaki, and K. Kokubo, Novel vortex dynamics in Corbino-disk superconductors, Physica C, 査読有, Vol. 470, 2010, S844-S845.
- (11) S. Okuma, T. Ichimura, H. Takeya, and K. Hirata, Unusual Pinning Induced by Vortex Motion in YNi_2B_2C , Physica C, 査読有, Vol. 470, 2010, S844-S845.
- (12) S. Okuma, Y. Suzuki, and Y. Tsugawa, Reversible to Irreversible Flow Transition in Driven Vortices, Physica C, 査読有, Vol. 470, 2010, S842-S843.
- (13) S. Okuma, Y. Suzuki, and K. Kokubo, Flow noise of driven vortex matter in amorphous superconducting films, AIP Conf. Proc., 査読有, Vol. 1129, 2009, 93-96.
- (14) S. Okuma, J. Inoue, and N. Kokubo, Broadband noise of driven vortices at the mode-locking resonance, AIP Conf. Proc., 査読有, Vol. 1129, 2009, 117-120.
- (15) S. Okuma, Y. Yamazaki, and N. Kokubo, Dynamic response and ordering of rotating vortices in superconducting Corbino disks, Phys. Rev. B, 査読有, Vol. 80, 2009, 220501(R)(1-4).
- (16) S. Okuma, H. Imaizumi, and K. Kokubo, Intrinsic quantum melting of a driven vortex lattice in amorphous Mo_xGe_{1-x} films, Phys. Rev. B, 査読有, Vol. 80, 2009, 132503(1-4).

[学会発表](計30件)

- (1) 上村和寛, 大熊 哲, 2次元超伝導体の極低温渦糸状態, 日本物理学会第67回年次大会, 2012年3月21日, 関西学院大学(兵庫県)
- (2) S. Okuma, Orientation of Fast Driven Abrikosov Lattice, Pathbreaking Phase Sciences in Superconductivity 2012 (PPSS2012) (招待講演), 2012年1月14日, 大阪歴史博物館(大阪府)
- (3) 大熊 哲, 嶋本大祐, 小久保伸人, 速度増大による渦糸格子方位のスイッチングと微視的機構, 第19回渦糸物理国内会議, 2011年12月9日, 物質・材料研究機構(つくば市)
- (4) S. Okuma, Dynamics of Flux Quanta in Amorphous Superconducting Films, BIT's 1st Annual World Congress of Nano-Science and Technology, Dalian, 2011年10月24日, Dalian(中国)

- (5) S. Okuma, A. Motohashi, Critical dynamics for depinning transition in sheared vortex solids, 24th International Symposium on Superconductivity (ISS'11), 2011年10月26日タワーホール船堀(東京都)
- (6) S. Okuma, Y. Tsugawa, and Y. Kawamura, Onset of irreversibility and dislocation in vortex lattice, 24th International Symposium on Superconductivity (ISS'11), 2011年10月26日, タワーホール船堀(東京都)
- (7) S. Okuma, D. Shimamoto, and N. Kokubo, Orientation of fast driven vortex lattice and quasiparticle lifetime, 24th International Symposium on Superconductivity (ISS'11), 2011年10月26日, タワーホール船堀(東京都)
- (8) H. Sato and S. Okuma, Vortex states at low temperature in thin amorphous films probed by mode-locking resonance, 24th International Symposium on Superconductivity (ISS'11), 2011年10月26日, タワーホール船堀(東京都)
- (9) 大熊 哲, 駆動された超伝導渦系系における新しい動的相転移, 青山学院大学物理・数理コロキウム, 2011年10月7日, 青山学院大学(神奈川県)
- (10) 大熊 哲, 超伝導渦系系における動的秩序化と新奇な動的相転移, 日本物理学会第66回秋季大会(招待講演), 2011年9月22日, 富山大学(富山県)
- (11) S. Okuma, D. Shimamoto, and N. Kokubo, Dynamic Ordering and Lattice Orientation of Driven Vortex Matter, 26th International Conference on Low Temperature Physics, 2011年8月12日, Beijing(中国)
- (12) H. Sato and S. Okuma, Mode-locking measurements for driven vortices in thick and thin amorphous M_xGe_{1-x} Films, 26th International Conference on Low Temperature Physics, 2011年8月12日, Beijing(中国)
- (13) 大熊 哲, 超伝導薄膜における量子渦系の動的秩序の解明, ワークショップ: 超低速ミュオン顕微鏡, 2011年5月29日, 東京工業大学(東京都)
- (14) 大熊 哲, 超伝導渦系系における新奇な動的相転移, ワークショップ: ナノ構造超伝導体における渦系状態(招待講演), 2011年1月28日, 大阪府立大学(大阪府)
- (15) D. Sato, D. Shimamoto, and S. Okuma, Mode-locking resonance for driven vortex matter in thick and thin superconducting films, International Symposium on Nanoscience and Quantum Physics, 2011年1月27日, 東京工業大学(東京)
- (16) A. Motohashi and S. Okuma, Plastic depinning in superconducting vortices, International Symposium on Nanoscience and Quantum Physics, 2011年1月27日, 東京工業大学(東京)
- (17) D. Shimamoto, S. Okuma, and N. Kokubo, Orientation of driven vortex lattice in amorphous superconducting films, International Symposium on Nanoscience and Quantum Physics, 2011年1月27日, 東京工業大学(東京)
- (18) 大熊 哲, 嶋本大祐, 小久保伸人, 高速駆動された渦系格子の量子融解と格子方位, 第18回磁束線物理国内会議, 2010年12月1日, 日本原子力研究開発機構(つくば市)
- (19) 本橋あゆみ, 津川裕斗, 大熊 哲, 渦系系における可逆不可逆転移とディピニング転移, 第18回磁束線物理国内会議, 2010年12月2日, 日本原子力研究開発機構(つくば市)
- (20) S. Okuma, D. Shimamoto, and N. Kokubo, Lattice orientation of driven vortices in the quantum regime, 23rd International Symposium on Superconductivity (ISS'10), 2010年11月3日, エポカルつくば(つくば市)
- (21) S. Okuma, Y. Matsumura, and N. Kokubo, Vortex-lattice rings rotated in a Corbino-disk superconductor, 23rd International Symposium on Superconductivity (ISS'10), 2010年11月3日, エポカルつくば(つくば市)
- (22) S. Okuma and Y. Tsugawa, Reversible to irreversible flow and absorbing transitions in sheared vortices, 23rd International Symp. on Superconductivity (ISS'10), 2010年11月3日, エポカルつくば(つくば市)
- (23) 嶋本大祐, 大熊 哲, 小久保伸人, 駆動速度による渦系固体の格子方位変化, 日本物理学会第65回年秋季大会 2010年9月23日, 大阪府立大学(大阪府)
- (24) 大熊 哲, 今泉広基, 嶋本大祐, 小久保伸人, 渦系固体の動的量子融解と格子のフロー状態, 日本物理学会第65回年次大会 2010年3月20日, 岡山大学(岡山県)
- (25) 松村有夏, 小久保伸人, 大熊 哲, 回転駆動された渦系格子リングの微視的構造変化, 日本物理学会第65回年次大会 2010年3月20日, 岡山大学(岡山県)
- (26) 大熊 哲, 高速駆動された渦系格子の動的相転移と微視的構造変化, 第17回磁

束線物理国内会議 2009 年 12 月 2 日, 大阪府立学中之島サテライト (大阪府)

- (27) 津川裕斗, 大熊 哲, 周期駆動された渦糸系における可逆不可逆転移とランダム組織化, 第 17 回磁束線物理国内会議 2009 年 12 月 2 日, 大阪府立大学中之島サテライト (大阪府)
- (28) S. Okuma, H. Imaizumi, and K. Kokubo, Quantum Melting of a Driven Vortex Lattice in Amorphous Superconducting Films, 12 th International Workshop on Vortex Matter in Superconductors (招待講演), 2009 年 9 月 13 日, 山中湖東大セミナーハウス (静岡県)
- (29) S. Okuma, Y. Yamazaki, and K. Kokubo, Novel vortex dynamics in Corbino-disk superconductors, 9th Int. Conf. on Materials and Mechanisms of Superconductivity (M2S)(招待講演), 2009 年 9 月 9 日, 京王プラザホテル(東京)
- (30) S. Okuma, Y. Suzuki, and K. Kokubo, Flow noise of driven vortex matter in amorphous superconducting films, 20th International Conference on Noise and Fluctuations, 2009 年 6 月 17 日, Pisa 大学 (イタリア)

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

大熊 哲 (OKUMA SATOSHI)

東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号 : 50194105