

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2020

課題番号：17K05537

研究課題名（和文）微小な超伝導単結晶薄膜に閉じ込めた量子渦状態と制御

研究課題名（英文）Manipulation of vortex states in small superconducting thin films

研究代表者

小久保 伸人（KOKUBO, NOBUHITO）

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号：80372340

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：微細穴をもつ微小な超伝導薄膜に誘起された量子渦状態を走査SQUID磁気顕微鏡で直接観測し、微細穴やその周囲への渦の侵入及び捕捉条件を明らかにした。さらに印可磁場と反対向きの磁束量子を伴う反渦とその分子状態の直接観測も成功し、これらが通常の冷却過程では誘起されない準安定な状態であることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

磁場中の微小超伝導体を示す物理現象の基礎的な理解につながるだけでなく、近年急速に発展する量子情報技術、とりわけ超伝導ナノ・マイクロ構造体を用いた様々な応用デバイスの性能向上に必要な基礎資料となる。

研究成果の概要（英文）：The manipulation of quantum vortex states was made by strategically introducing holes in small dots of superconducting thin films. Using a scanning SQUID microscope we were able to image symmetric cluster made of an antivortex and three vortices in a superconducting triangle dot by utilizing the magnetic history and the pinning effect. We found that the observed vortex cluster is metastable state, realized through the non-equilibrium process and is not induced when the sample is cooled in a uniform magnetic field.

We also found that the penetration of vortices in small superconducting dots is highly size dependent and obey a universal scaling relationship. The results are useful for trapping or eliminating vortices in superconducting nano-micro structures, which can be crucial elements for designing various devices for quantum information processing, memory and metrology.

研究分野：低温物理

キーワード：超伝導材料・素子 量子渦 メゾスコピック系 走査プローブ顕微鏡 低温物性

1. 研究開始当初の背景

磁束量子 $\Phi_0 (= h/2e)$ を伴う超伝導電流の量子渦は、超伝導体の磁気特性を支配する重要な“粒子”の一つである。特に抵抗ゼロの真の超伝導状態を破る渦の運動は、臨界電流の向上を目指すバルクな線材を対象に研究が進められ、十分な理解が得られてきた。最近では、急速に発展する量子技術、とりわけ超伝導ナノ・マイクロ構造体を使った共振回路において渦の役割が再び注目を集めている。試料形状やサイズに強く依存した渦状態の理解が基礎資料として必要となっていた。

これまで我々は、円や正方形、三角形といった単純な構造をもつ超伝導薄膜を舞台に、多角形状の量子渦クラスター(分子)や巨大渦などの微小系特有な渦状態を調べてきた。本課題で着目する「反渦を伴う渦分子」の探索はその流れの一つである。反渦は印可磁場とは反対向きの磁束量子を伴う電流の渦である。通常、渦の巻き方は印可磁場の向きで定まることになるが、試料形状の対称性(ここでは離散的な C_n 対称性)がこの原理原則を覆す可能性がある。例えば、正三角形形状の試料の場合、3つの量子渦で構成される三角配列が試料形状の対称性を満足してコメンシュレイト(つりあい)となる。この対称性を保ちながら渦度を1つ減らすと、その重心の位置に反渦の誘起が必要とされる。しかし、実際の試料に内在する不均質性を考慮した詳細な計算では、渦配置の僅かなズレが反渦と渦との対消滅を引き起こし、反渦分子は不安定化する。このため反渦分子を実証するには対消滅を抑える方策が必要とされていた。

2. 研究の目的

渦の配置を固定する微細穴を微小な超伝導薄膜に導入し、渦の侵入・捕捉条件と反渦分子の安定性を解明する。

3. 研究の方法

ピン止め効果が弱いアモルファス MoGe 薄膜と均質性に優れた 2H-NbSe₂ 単結晶薄片の超伝導体を電子線及び紫外線リソグラフィと反応性ドライ/ケミカルエッチングを併用したプロセスで微細加工した。微小な超伝導薄膜に誘起された量子渦は走査 SQUID 磁気顕微鏡(セイコーインスツルメンツ(株)製、SQM-2000)を用いて磁氣的に観察した。膜へ侵入する(常伝導コアをもつ)渦と微細穴へ侵入する(コアのない)渦とを区別し、それぞれの渦の侵入・捕捉条件を定量的に調べ、微細穴を利用した反渦分子の観測を目指した。

4. 研究成果

(1) 渦の侵入・捕捉条件

最も単純な一つ穴の超伝導リングを用いて渦の侵入・捕捉条件を定量的に調べた。図1の磁気イメージに示すように一様な印可磁場下で冷却すると中央の穴に磁束が侵入し、これを取り巻く周回電流の(コアのない)渦が誘起された。印可磁場の強度を増加させると、リングを構成する超伝導膜に(コアを持つ)渦が侵入し、印可磁場の増加とともにその渦の数が増えた。後者の(コアを持つ)渦が捕捉される最初の磁場 H_p は線幅(リング幅) w で決まり、 $\mu_0 H_p = A \Phi_0 / w^2$ ($A = 1.9$ がリング、 1.8 が正方形)と定量的に関係づけられた。得られた侵入磁場と線幅の関係は、比例係数がわずかに異なるだけで正方形でも成立し、渦の自由エネルギーの議論で説明されることが分かった。これらの結果より、微細穴のみに渦を捕捉させる磁場範囲を見積もることができた。

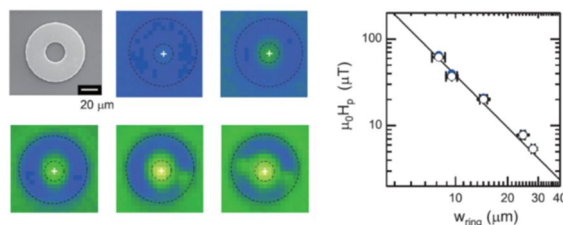


図1. 微小超伝導リングのSEM像と磁場中冷却で得られた磁気像。渦の侵入がはじまる臨界磁場のサイズ依存性もまとめた。

(2) 反渦分子の安定性

次に図2aに示すような微細穴を正三角形形状のアモルファス超伝導薄膜に設け、誘起された渦配列を調べた。得られた反渦分子の観測例を図2cに示す。重心の位置にある反渦が対称な位置にある3つの渦に囲まれた反渦分子で、印可磁場を多少変化させても対消滅を起こさなかった。渦が欠けた不完全な反渦分子では対消滅で不安定化したことから、図2cの反渦分子は微細穴へのピン止めと配置の対称性で安定化した渦状態であることが分かった。

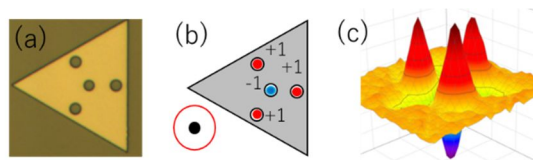


図2. アンチドットをもつ正三角形形状のアモルファス超伝導膜における反渦分子状態。試料の光学顕微鏡写真(a)と磁束(渦)配置(b)走査SQUID磁気顕微鏡イメージ(c)を示す。

観測した反渦分子は、通常の一様磁場下の冷却過程では誘起されず、あらかじめピン止め捕捉

した渦を印可磁場の反転で反渦化し、その後、周囲の穴に渦を誘起したものであった。この事実をより確かなものとするため、良質な NbSe₂ 単結晶薄片から同等な形状の試料を作製し、不均質性による対消滅を抑えた渦配列の観測実験を試みた。結果は変わらず、一様磁場下の冷却だけで反渦分子の観測に至らなかった。非平衡過程を経て微細穴に捕捉された反渦分子は、少なくとも我々が実験的に扱った試料サイズにおいて、準安定な状態であることが分かった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kokubo N., Okayasu S., Nojima T.	4. 巻 125
2. 論文標題 Finite-size effect of critical penetration of Pearl vortices in narrow superconducting flat rings	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 223906 ~ 223906
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5100497	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Mitsuishi M, Kokubo N, Kitano K, Okayasu S, Nojima T, Sasaki T	4. 巻 969
2. 論文標題 Direct observation of magnetic flux and interstitial vortices in perforated mesoscopic squares of superconducting films	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012074 ~ 012074
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/969/1/012074	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yoshida J, Ando H, Kokubo N	4. 巻 969
2. 論文標題 Flux-flow instability in 2H-NbSe ₂ superconducting thin crystals stamped on SiO ₂ /Si substrates	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012073 ~ 012073
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/969/1/012073	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計17件（うち招待講演 1件/うち国際学会 7件）

1. 発表者名 N. Kokubo, S. Okayasu, T. Nojima
2. 発表標題 Observation of vortex trapping and expulsion in superconducting rings of amorphous MoGe thin films
3. 学会等名 32th International Symposium on Superconductivity (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小久保伸人, 岡安悟, 野島勉
2. 発表標題 微小超伝導体の渦糸トラップとアンチドットクラスタの磁束状態
3. 学会等名 第27回渦糸物理ワークショップ
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小久保伸人
2. 発表標題 微小超伝導体に閉じ込めた量子磁束状態と制御
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小久保伸人
2. 発表標題 超伝導渦糸系のデピニングとナノプローブ顕微鏡の開発
3. 学会等名 ナノカーボン研究部門2018年度成果報告会 & 電気通信大学ナノトライボロジー研究センター合同研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小久保伸人, 岡安悟, 野島勉, 佐々木孝彦
2. 発表標題 超伝導薄膜リングにおける磁束集束効果と渦糸捕捉
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小久保伸人
2. 発表標題 微小超伝導体における渦糸状態の制御と磁気プローブ
3. 学会等名 第26回渦糸物理国内会議
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nobuhito Kokubo
2. 発表標題 Manipulation and magnetic probe of vortex matter in mesoscopic superconductors
3. 学会等名 The fifth MIPT-UEC=LPI International Workshop on Atomic, Molecular and Optical Physics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 N. Kokubo, S. Okayasu, T. Nojima, T. Sasaki
2. 発表標題 Observation of vortex trapping and expulsion in superconducting rings of amorphous MoGe thin films
3. 学会等名 31th International Symposium on Superconductivity (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Mitsuishi M, Kokubo N, K, Okayasu S, Nojima T, Sasaki T
2. 発表標題 Observation of fluxoid states and interstitial vortices in perforated mesoscopic triangle of amorphous superconducting films
3. 学会等名 30th International Symposium on Superconductivity, Tokyo (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kokubo N, Okayasu S, Nojima T, Sasaki T
2. 発表標題 Manipulation of Fluxon States in Microstructured Superconducting Thin Films
3. 学会等名 10 th international conference on vortex matter in nanostructured superconductors (Vortex X) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Mitsuishi M, Kokubo N, Kitano K, Okayasu S, Nojima T, Sasaki T
2. 発表標題 Observation of flux states and interstitial vortices in perforated mesoscopic squares of amorphous superconducting films
3. 学会等名 The 28th International Conference on Low Temperature Physics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yoshida J, Ando H, Kokubo N
2. 発表標題 Flux-flow instability in cleaved thin films of 2H-NbSe ₂ single crystals
3. 学会等名 The 28th International Conference on Low Temperature Physics, Gothenburg (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小久保伸人、岡安悟、野島勉、佐々木孝彦
2. 発表標題 走査 SQUID 顕微鏡で観測した微小超伝導体の渦糸・反渦糸状態
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 織田健佑、小久保伸人、岡安悟、野島勉、佐々木孝彦
2. 発表標題 アンチドット型超伝導渦系セルの磁気像と電流分布解析
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小久保伸人、岡安悟、野島勉、佐々木孝彦
2. 発表標題 微小超伝導体に導入したアンチドット配列と渦系・反渦系状態
3. 学会等名 ワークショップ「新規超伝導体・ナノ構造超伝導体における渦系物理」
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小久保伸人、岡安悟、野島勉、佐々木孝彦
2. 発表標題 微小超伝導体の微細孔に誘起した磁束状態
3. 学会等名 第25回渦系物理国内会議
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 三石真里江、小久保伸人、岡安悟、野島勉、佐々木孝彦
2. 発表標題 アンチドットをもつ微小アモルファス超伝導体の磁束状態
3. 学会等名 日本物理学会 2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	岡安 悟 (OKAYASU SATORU) (50354824)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究 部門 原子力科学研究所 先端基礎研究センター・研究主幹 (82110)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携 研究者	野島 勉 (NOJIMA TSUTOMU) (80222199)	東北大学・金属材料研究所・准教授 (11301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------