

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 6 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26287075

研究課題名(和文) ナノドットを用いた微小超伝導体の反量子渦状態と制御

研究課題名(英文) Manipulation of vortex and anti-vortex states in small superconductors with antidots

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) 10,200,000円

研究成果の概要(和文)：アンチドット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、整数倍の磁束量子を伴う多重渦の量子化過程や、アンチドット配置の対称性を反映した独特な配列状態を、アンチドット間に侵入する量子渦を含めて明らかにした。さらにアンチドットのピン止め効果と磁場履歴とを組み合わせた制御手法を考案し、これまで観測が困難であったメソスケール特有の反量子渦・量子渦分子の観測を通じて、この手法の有効性を実証した。

研究成果の概要(英文)：We have investigated vortex states confined in small squares of superconducting thin films with strategically introduced antidots. Scanning SQUID microscope images allow us to trace how vortices are trapped in antidots in different vorticities. We obtained several novel findings of (1) unique configurations of singly and multiply quantized vortices, (2) configurational symmetry and stability of the vortex states imposed with antidots, including interstitial vortices between antidots. We also manipulated the vortex states by utilizing the field history and the pinning effect in antidots and succeeded in visualizing vortex and antivortex clusters.

研究分野：数物系科学 物性II

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

### 1. 研究開始当初の背景

磁場によって誘起される超伝導体の量子渦は、その中心に量子化された磁束  $\Phi_0 (=h/2e)$  を伴い、互いにはたらく斥力相互作用により周期的な三角格子へ量子渦配列を秩序化させる。僅か数個の量子渦しか誘起されない微小な超伝導体では状況が異なる。超伝導体の端に流れる遮蔽電流の影響により、試料中心部へ向かう閉じ込め力が量子渦に加わる。このため、超伝導体の形状を反映した独特な量子渦配列が形成される。例えば微小な円板では、量子渦の多角形配列やシェルと呼ばれる同心円状に並んだリング配列が現れる。閉じ込めが強くはたらく場合、複数の量子渦が強く重なり合い一つに融合した巨大量子渦となる。これは複数の磁束量子  $n \Phi_0$  ( $n$  は 2 以上の整数) を伴う大きな量子渦であり、単一の磁束量子を伴う量子渦と区別される。

印加磁場に対して反対向きの磁束量子を伴う反量子渦はさらに興味深い。離散的な  $C_n$  対称性で特徴づけられる多角形状の試料で強い閉じ込めが加わると、対称性を満足する量子渦の多角形クラスタのみが出現するが、これがどんな過度でも成立するには、反量子渦の誘起が必要となる。実際の系で強い閉じ込めを実現するには、量子渦どうしが強く重なる極小試料が必要となる。さらに試料に内在する不均一性を考慮すると、量子渦どうしの対消滅の可能性が否定できなくなる。このため反量子渦を伴うクラスタ状態の実証は困難と考えられてきた。

その後、反量子渦クラスタを誘起する新たな仕掛けとして、微小超伝導体に強磁性体ドットを組み合わせた方法と微細な孔(アンチドット)を導入する方法がそれぞれ提案された。前者は漏れ磁場を使った 3 次元ハイブリッド構造体である。強磁性体と超伝導体の界面で反量子渦が生じることになり、表面を走査する一般的な顕微鏡技術で捉えるのは困難である。一方後者は、渦配列の対称性をアンチドットで強制し、反量子渦の誘起を促す方法である。微小超伝導体に孔を開けるだけなので、実験観察に大きな制約は伴わない。むしろ、反量子渦と量子渦の距離をアンチドットの配置により引き離すことができるので、本来の磁束の向きの違いを区別できるようになる。超伝導量子干渉計 (SQUID) や微小ホール素子などの磁気プローブを使った可視化実験は好都合である。

### 2. 研究の目的

そこで本研究では、アンチドットを導入した正方形の微小超伝導体に着目し、巨大量子渦や反量子渦を伴うクラスタ状態の磁気的な直接観測とアンチドットを使った量子渦状態の精緻な制御を目指した。

### 3. 研究の方法

本研究は、均質性に優れたアモルファス構造の超伝導膜を用いた。電子線及び紫外線リソ

グラフィックと反応性ドライエッチング・ケミカルエッチングを併用したプロセスで微細加工を施した。量子渦の可視化は走査 SQUID 磁気顕微鏡を用いた。研究分担者である岡安悟氏、連携研究者である野島勉氏と協力して進めた。

### 4. 研究成果

#### (1) 一つ孔の量子渦状態

まずアンチドットを試料中央に設け、その磁場分布を走査 SQUID 磁気顕微鏡で精緻に調べた。アンチドットの直径は数ミクロンとした。これはアモルファス超伝導薄膜を特徴づける有効磁場侵入長と同程度であり、量子渦のピン止め効果を高める。図は磁場中冷却で得られた磁気イメージである。試料に印加した磁場は、アンチドットの中心付近に集束し、その磁束は磁束量子の整数倍に量子化されることを示した。

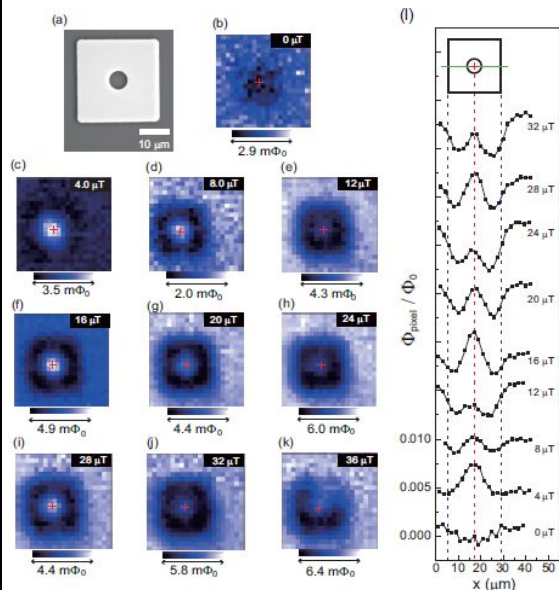


図. アンチドットに誘起された量子化磁束の磁気イメージ

さらに磁場を増加させると、アンチドット周囲の超伝導膜に量子渦が侵入し、アンチドットで多重化した巨大渦と超伝導膜を貫く渦の共存状態が現れた(図 k)。共存を特徴づける超伝導膜への量子渦の侵入は、アンチドットの磁束の飽和とは無関係であること、特徴づける量子渦の侵入磁場は試料形状に依存し、大雑把に試料端とアンチドットとの最短距離の 2 乗に反比例することを見出した。得られて結果は、SQUID のようなループ構造を持つ超伝導素子の磁気ノイズの低減につながることを示した。

#### (2) 複数の孔の量子渦状態

次に、正方形試料中央とその周りの  $C_4$  対称性を満たす位置にアンチドットを導入し、上記で得られた知見を活かした可視化実験を行った。すべてのアンチドットが非占有の状態から単一の磁束量子  $\Phi_0$  で占められる第一マッチング状態まで、アンチドットの配置や渦

間相互作用を反映したさまざまな渦配列が得られ、超伝導ネットワーク的な性質（アンチドットの占有・非占有パターンの対称性）で特徴づけられることを見出した。さらに磁場を増加させていくと、一部のアンチドットに  $2 \phi_0$  の磁束量子を伴う巨大渦が現れること、これが  $\phi_0$  の磁束量子を伴う量子渦と共存した独特な配列を形成すること、③やがてアンチドットの磁束の飽和とは無関係にアンチドット間の超伝導膜に量子渦の侵入が起こり、第二マッチング状態が現れないことを見出した。得られ結果は、超伝導アンチドット格子系で起こる格子間渦の対策につながることを示した。

### (3) 反量子渦と量子渦の共存状態

次に正方形の微小超伝導で期待される反量子渦の観測を試みた。量子渦の平衡状態が誘起される磁場中冷却法では観測できなかったため、新たなアプローチとしてアンチドットによるピン止め効果と磁場反転操作とを併用する手法を試みた。その結果、反量子渦と量子渦のペア状態を見出すことに成功した。表面バリアの影響により、対称性を満たす反量子渦クラスタ状態は見出せなかったが、磁場反転時の磁場掃引の速さの調整とアンチドット配置の改善で解決の糸口が見えた。

本研究で実証したアンチドットと磁場履歴を使った量子渦状態の制御手法は、今後、反量子渦クラスタ状態を含むメゾスケールの基礎物性の解明やそれを用いたデバイス応用の発展につながると期待される。

## 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 6 件)

Yoshida J, Ando H, Kokubo N, Flux-flow Instability in 2H-NbSe<sub>2</sub> Superconducting Thin Crystals Stamped on SiO<sub>2</sub>/Si Substrates, Journal of Physics: Conf. Series, 査読有, Vol 969, 2018, pp. 012073 (5 pages), <http://10.1088/1742-6596/969/1/012073>  
M Mitsuishi, N. Kokubo, H. Miyahara, S. Okayasu, T. Nojima, T. Sasaki, Direct Observation of Magnetic Flux and Interstitial Vortices in Perforated Mesoscopic Squares of Superconducting Films, Journal of Physics: Conf. Series, 査読有, Vol 969, 2018, pp. 012074 (6 pages), <http://10.1088/1742-6596/969/1/012074>  
N. Kokubo, H. Miyahara, S.

Okayasu, and T. Nojima, Vortex Shells in Mesoscopic Triangles of Amorphous Superconducting Thin Films, Physica C, 査読有, Vol. 530, 2016, pp. 42-45, <http://10.1016/j.physc.2016.05.009>

N. Kokubo, H. Miyahara, S. Okayasu, and T. Nojima, Commensurate and incommensurate Vortex States Confined in Mesoscopic Triangles of Weak Pinning Superconducting Thin Films, Journal of the Physical Society of Japan, 査読有, Vol. 84 No. 4, 2015, pp.043704(4 pages), <http://10.7566/JPSJ.84.043704>

小久保伸人, 幾何学的構造を持つ微小超伝導体に閉じ込めた量子渦配列, 固体物理, 査読有, Vol 594 (No.8), 2015, pp. 437-446

N. Kokubo, S. Okayasu, T. Nojima, H. Tamochi, B. Shinozaki, Direct Imaging of Vortex Polygons and Vortex Shells in Mesoscopic Squares of a Weak Pinning Superconducting Thin Film, Journal of the Physical Society of Japan, 査読有, Vol. 83 (No. 8), 2015, pp. 083704 (5 pages), <http://10.7566/JPSJ.83.083704>

### 〔学会発表〕(計 30 件)

小久保伸人, 岡安悟, 野島勉, 佐々木孝彦, 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, 日本物理学会第 73 回年次大会, 2018

小久保伸人, 岡安悟, 野島勉, 佐々木孝彦, 微小超伝導体に導入したアンチドット配列と渦糸・反渦糸状態, 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糸物理」, 2018

Mitsuishi M, Kokubo N, Okayasu S, Nojima T, Sasaki T, Observation of fluxoid states and interstitial vortices in perforated mesoscopic triangle of amorphous superconducting films, 30th International Symposium on Superconductivity, 2017

小久保伸人, 岡安悟, 野島勉, 佐々木孝彦, 微小超伝導体の微細孔に誘起した磁束状態, 第 25 回渦糸物理国内会議, 沖

縄科学技術大学、2017

Kokubo N, Okayasu S, Nojima T, Sasaki T, Manipulation of Fluxon States in Microstructured Superconducting Thin Films, 10 th international conference on vortex matter in nanostructured superconductors (Vortex X), 2017

小久保伸人, 北野恒平, 三石真里江, 岡安悟, 野島勉, 佐々木孝彦, 微細孔をもつ微小な正方形超伝導体の磁束状態、日本物理学会第 72 回年次大会、2017

小久保伸人, 岡安悟, 野島勉, 佐々木孝彦, 小さな超伝導体に閉じ込めた磁束状態の可視化と制御、ナノトライボロジー研究ステーション主催「電通大-理科大合同研究会」, 2017

小久保伸人, 北野恒平, 三石真里江, 岡安悟, 野島勉, 佐々木孝彦, 微細孔を用いた微小超伝導体の磁束状態と制御、ワークショップ「ナノ構造超伝導体中の渦糸物理」, 2017

小久保伸人, 北野恒平, 岡安悟, 野島勉, 佐々木孝彦, 微細孔をもつ正方形の微小超伝導体に閉じ込めた磁束状態, 第 24 回渦糸物理国内会議、2016

Kitano K, Kokubo N, Okayasu S, Nojima T, Sasaki T, Manipulation of Magnetic Flux States in Superconducting Squares with Artificial Pinning Sites, 29th International Symposium on Superconductivity, 2016

小久保伸人, 北野恒平, 岡安悟, 野島勉, 佐々木孝彦, 人工ピン止めを導入した正方形の微小超伝導体における渦糸状態、日本物理学会 2016 年秋季大会、2016

小久保伸人, 宮原大, 岡安悟, 野島勉, 佐々木孝彦, 三角形の微小超伝導体における多重渦状態と殻構造、日本物理学会第 71 回年次大会、2016

小久保伸人, 宮原大, 岡安悟, 野島勉,

多重渦状態と殻構造、第 23 回渦糸物理国内会議、2015

小久保伸人, 北野恒平, 望月麟太郎, 岡安悟, 野島勉, 佐々木孝彦, 微細構造を持つ微小超伝導体に閉じ込めた多重渦状態と制御, 第 23 回渦糸物理国内会議、2015

Kokubo N, Okayasu S, Nojima T, Sasaki T, Observation of Multi-Vortex States Confined in Mesoscopic Superconductors of Different Geometric Shapes, 28th International Symposium on Superconductivity, 2015

小久保伸人, 微小超伝導体の幾何学的形状と量子渦配列、第 22 回渦糸物理国内会議、2014

[ 図書 ] ( 計 2 件 )

Kokubo N, Okayasu S, K. Kadowaki, Oxford University Press, MULTI-VORTEX STATES IN MESOSCOPIC SUPERCONDUCTORS, The Oxford Handbook of Small Superconductors, Aant Narlikar (Ed.), Chapter 3, 2016, pp. 81-107, <http://10.1093/acprof:oso/9780198738169.003.0003>

門脇 和男 他、裳華房出版、超伝導磁束状態の物理、2017、pp.226-232 ( 3.3.2 幾何学的に閉じ込められた磁束の配列 )

## 6 . 研究組織

### (1) 研究代表者

小久保 伸人 ( Kokubo Nobuhito )

電気通信大学・情報理工学研究科・准教授  
研究者番号：80372340

### (2) 研究分担者

岡安 悟 ( Okayasu Satoru )

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター・研究主幹  
研究者番号：50354824

### (3) 連携研究者

野島 勉 ( Nojima Tsutomu )

東北大学・金属材料研究所・准教授  
研究者番号：80222199