

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23540416

研究課題名(和文)幾何学的に閉じ込められた磁束量子状態

研究課題名(英文)Vortex matter confined in mesoscopic superconductors of different geometric shapes

研究代表者

小久保 伸人(KOKUBO, NOBUHITO)

電気通信大学・情報理工学(系)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) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：三角形及び正方形のアモルファス微小超伝導体に閉じ込めた多重渦糸状態を走査SQUID磁気顕微鏡で直接観察し、形状を反映した独特な渦糸配列やその成長過程を実験的に初めて見出した。渦糸配置と試料形状との幾何学的つり合いで誘起される反渦糸の観測には至っていないが、関連して、四角形状に配列した渦糸の殻構造や充填規則に現れる双安定な渦糸状態、閉じ込め形状の変形に対する渦糸配列の安定性・対称性など幾何学的つり合いに起因する新たな性質を見出した。

研究成果の概要(英文)：We present direct observation of multi-vortex states confined in square and triangle dots of amorphous superconducting films by a scanning SQUID microscope. The results allow us not only to find unique vortex states imposed by the sample shape, but also to trace systematically, for the first time, how the vortex pattern evolves with an applied magnetic field. Although the symmetry induced-anti-vortex state has not yet been found, as related to this issue, we obtain several novel findings of (1) the filling rule for square vortex shells, (2) bistability of vortex states, and (3) configurational symmetry and stability with respect to the geometrical deformation. These features are governed by the commensurability between the geometry and the vortex arrangement in dots.

研究分野：数物系科学

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(SSM) 低温物性

## 1 . 研究開始当初の背景

(1) 小さな超伝導体では、量子化磁束を伴う電流渦 ( 渦系 ) が試料形状を反映した独特な配列状態を形成する。これは渦間に働く斥力相互作用と形状による幾何学的な閉じ込めが競合した結果であり、閉じ込めた渦系数に応じて、さまざまな渦系配列が現われる。特に複数の渦系が強く重なり合い一つに統合した巨大渦系や閉じ込めの対称性により誘起される反対向きの渦系 ( 反渦系 ) は、微小系特有な渦系状態として注目され、議論されてきた。

(2) 巨大渦系状態は、超伝導転移温度の磁場による振動やのこぎり波状に変化する磁化曲線から見出され、渦系配列の空間分布を捉える微小トンネル接合の実験により確認された。その後、走査トンネル顕微鏡により直接観測され、決着している。

(3) 一方、複数の渦系で形成される多重渦系状態は、巨大渦系の研究と併せて見出され、超伝導渦系の可視化技術の発展と歩調を合わせ、その配列状態が明らかにされてきた。特に円形の微小超伝導体では、殻構造の概念が適用できる同心円状の渦系配列が観測され、メンデレーエフの周期律に似た充填規則が見出されている。

(4) 閉じ込め形状を円形から多角形にすると、閉じ込め形状と配列との間に幾何学的なつり合いが生じる。これは形状と一致する配列構造を安定化させるため、同心円状の配列を想定する殻構造の概念を適用できるかどうか自明でなくなる。また、つり合い条件を満たさなくなると、閉じ込め形状に従った変形により弾性エネルギーが配列に蓄えられる。明確な基底状態が定まらず、複数の配列状態が可能となり、問題は複雑化する。形状の対称性により誘起される反渦系の出現はこの問題の一部とされる。

(5) 多角形状の微小超伝導体に閉じ込めた渦系状態の可視化実験は、これまで数例しか報告されておらず、いずれも断片的で、殻構造や充填規則に関する情報はほとんど得られていない。上記の問題を解明するためには、渦系配列の成長過程を系統的に可視化する実験が必要とされていた。

## 2 . 研究の目的

(1) 反渦系の出現が期待される三角形及び正方形の微小超伝導体に着目し、閉じ込めた多重渦系配列の成長過程から、殻構造や充填規則に関する理解を得ることを目的とする。

(2) さらに多重渦系状態に与える幾何学的つり合い効果を、反渦系も含めて解明することを目指した。

## 3 . 研究の方法

(1) 試料はアモルファス MoGe 超伝導膜を用いた。数ナノメートルの短いコヒーレンス長とサブミクロン程度の長い磁場侵入長で特徴づけられる第二種超伝導体である。組成比 ( Mo / Ge 比 ) が均質であれば、ピン止め効果が非常に弱い超伝導特性を有する。本質的な渦系状態を調べる格好の舞台となる。

(2) 本研究に必要な三角形及び正方形の微小超伝導体は、高周波スパッタ装置で成膜したアモルファス一様膜から作製する。アモルファス構造は熱的に劣化しやすいので、微細加工プロセスに含まれる加熱工程を見直さなければならない。アモルファス膜に適した加工プロセスを構築する。

(3) 渦系はその中心に磁束量子を伴うため、磁氣的に可視化が可能である。表面に磁性微粒子を直接蒸着する手法 ( 磁気装飾法 ) が一般的に用いられているが、磁性粒子を取り除くことはできないため、繰り返し実験を行うことができない。渦系配列の成長過程を同じ試料で捉えるには別の手法が必要となる。本研究では、僅かな磁場を捉えられる超伝導量子干渉計 ( S Q U I D ) を試料表面で走査し、渦系配列を可視化する走査 S Q U I D 磁気顕微鏡を用いることにした。

## 4 . 研究成果

(1) 正方形及び三角形の微小アモルファス超伝導体に閉じ込めた多重渦系状態を直接観測した。印加磁場の大きさを調整しながら誘起された渦系配列の成長過程を調べ、これまで理論的な考察に限られていた充填規則を実験的に初めて見出した。

(2) 関連して、幾何学的つり合いが渦系状態に果たす新たな性質をいくつか見出した。

まず正方形の微小試料では、形状を反映した四角形状の殻構造が形成され、殻を構成する渦系数が 4 , 1 2 のとき閉殻となることを実験的に明らかにした。

幾何学的なつり合いから外れると、基底状態と準安定状態の区別が明確でなくなり、同じ渦系数でも複数の配列状態が観測された。これは幾何学的なつり合いが充填規則に与える重要な性質であり、渦系配列に双安定性があることを実証した初めて実験例となった。

三角形の試料でも形状を反映した独特な渦系配列が現われたが、同心円状の配列を想定する殻構造の概念で説明し難いことが分かった。代わりに、つり合い条件を積極的に活用した新たな分類法が有効であることを示し、本研究で初めて実証した。

さらに渦系配列の ( 幾何学的変形に対する ) 安定性と対称性が幾何学的つり合いと密接に関連していることも見出した。つり合い状態では、三角格子の一部がそのまま現われるため、正三角形の対称性を伴う安定な配列

状態となる。一方，つり合いを満たさない場合，形状と渦間相互作用が競合した複雑な問題となるが，閉じ込め形状を正三角形だけでなく二等辺三角形まで対象を広げ，得られた渦系配列を詳しく調べたところ，対称性の低い（二等辺三角形に現れるような）配列が現われることを見出した。これも幾何学的つり合いが起因する新たな性質である。計算機実験で同様な対称性を持つ配列が報告されていたが，実証したのは本研究が初めてであった。

(3)幾何学的なつり合いにより誘起される反渦系の観測はできなかったが，上記で述べたように，幾何学的つり合いが多重渦系状態に重要な役割を果たしていることを実証することができた。今後の反渦系状態に関する研究を進める上で貴重な基礎データになると期待される。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

1. 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, p.043704 (4 pages), 10.7566/JPSJ.84.043704.
2. N. Kokubo, S. Okayasu, T. Nojima, H. Tamochi, and 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, p.083704 (5 pages), 10.7566/JPSJ.83.083704.
3. N. Kokubo, T. Yoshimura, and B. Shinozaki : Flow and Tilt-Induced Orientation of the Moving Vortex Lattice in an Amorphous NbGe Superconducting Thin Film, Journal of the Physical Society of Japan, 査読有, Vol. 82 No. 9, 2014, p.094702 (7 pages), 10.7566/JPSJ.82.094702.
4. S. Okayasu, T. Ono, T. Nishio, Y. Iguchi, T. Mashimo, Separation in  $\alpha$ -Phase of BiPb Alloy under Mega-Gravity, Defect and Diffusion Forum, 査読有, 323-325, 2012, pp. 545-548, 10.4028/www.scientific.net/DDF.323-325.545

〔学会発表〕(計 12 件)

1. 小久保伸人, 幾何学的に閉じ込められた

超伝導量子渦, 物性研究所短期研究会「スーパーマターが拓く新量子現象」, 正形状の微小超伝導体における渦系配列, 2014年4月19日, 東京大学物性研究所.

2. 小久保伸人, 宮原大, 岡安悟, 多持洋孝, 篠崎文重, 野島勉, SQUID 顕微鏡で見た三角形の微小超伝導体における量子渦配列, 日本物理学会第 69 回年次大会, 2014年3月28日, 東海大学湘南キャンパス.
3. 山崎史磨, 佐藤能英瑠, 宮原大, 小久保伸人, 超伝導窒化膜の渦系フローチャネルに閉じ込めた渦系格子の方位, 日本物理学会第 69 回年次大会, 2014年3月27日, 東海大学湘南キャンパス.
4. 小久保伸人, SQUID 顕微鏡で直接観測した微小超伝導体の磁束配列, 日本物理学会 2013 年秋季大会(招待講演), 2013年9月27日, 徳島大学.
5. 西尾太郎, 平井雄也, 清水秀樹, 小野正雄, 岡安悟, 緒方裕大, 真下茂, 超重力場を用いた超伝導合金の研究と今後の展開, 2013 年春季 第 60 回応用物理学会学術講演会, 2013年3月28日, 神奈川工科大学.
6. 小久保伸人, 宮原大, 岡安悟, 多持洋孝, 篠崎文重, 幾何学的に閉じ込められた磁束量子渦状態 II, 日本物理学会第 68 回年次大会, 2013年3月26日, 広島大学.
7. 小久保伸人, 正形状の微小超伝導体における渦系配列, 第 20 回渦系物理国内会議, 2012年12月9日, 鷺羽山下電ホテル(岡山).
8. 小久保伸人, 岡安悟, 多持洋孝, 篠崎文重, 幾何学的に閉じ込められた磁束量子渦状態, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012年9月18日, 横浜国立大.
9. Nobuhito Kokubo, Scanning SQUID Microscope Study of Vortex Configurations in Amorphous Superconducting Dots, Pathbreaking Phase Sciences in Superconductivity 2012(招待講演), 2012年1月15日, Osaka Museum of History.
10. 小久保伸人, 吉村哲也, 篠崎文重,  $\alpha$ -NbGe 超伝導膜の傾斜磁場下における磁束格子フロー III, 日本物理学会第 67 回年次大会, 2012年3月24日, 関西学院大学西宮上ヶ原キャンパス.
11. 上原広大, 江崎翔平, 多持洋孝, 小久保伸人, 山田和正, 篠崎文重, 超伝導細線の温度抵抗特性, 第 117 回日本物理学会九州支部例会, 2011年12月3日, 佐賀大学.
12. 多持洋孝, 小久保伸人, 篠崎文重, 駆動状態における磁束格子の方位と試料端の形状効果, 第 117 回日本物理学会九州支部例会, 2011年12月3日, 佐賀大学.

## 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)  
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