

研究種目：基盤研究 (B)  
 研究期間：2007-2008  
 課題番号：19340096  
 研究課題名 (和文)  
 走査トンネル顕微鏡高時間分解能測定による超伝導渦糸ダイナミクスの研究  
 研究課題名 (英文)  
 Scanning Tunneling Microscopy of Vortex Dynamics in Superconductors with High Time resolution  
 研究代表者 西田 信彦 (NISHIDA NOBUHIKO)  
 東京工業大学・大学院理工学研究科・教授  
 研究者番号：50126140

## 研究成果の概要：

極低温(0.16K)・高磁場(15T)ではたらく走査トンネル顕微鏡を開発、これを用いて、磁場4Tまで、温度0.4K、4.2Kにおいて第2種超伝導体  $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$  の超伝導渦糸の磁場勾配を駆動力とする渦糸集団運動を可視化し、動画を作ることに成功した。渦糸格子の刃状転位が、渦糸束の大きさを決め、渦糸集団運動に重要な働きをしていることを、走査トンネル顕微鏡による実空間・実時間測定により初めて明らかにした。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	12,100,000	3,630,000	15,730,000
2008年度	2,600,000	780,000	3,380,000
年度			
年度			
年度			
総計	14,700,000	4,410,000	19,110,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性II

キーワード：超伝導、量子渦糸、走査トンネル顕微鏡、渦糸クリープ

## 1. 研究開始当初の背景

磁場中超伝導体の渦糸状態の研究は、超伝導の応用、基礎科学研究の両面から重要である。研究代表者(西田)は、高磁場(15T)・極低温下(0.45K)、原子長空間分解能で走査トンネル分光が可能な走査トンネル分光顕微鏡(STM/STS)を開発し、高温超伝導体(Bi-2212)(JPSJ 72(2003)2153)、硼炭化物超伝導体  $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$ (JPSJ 73(2004)3247)、Ceを含んだ超伝導体  $\text{CeRu}_2$ (JPSJ 69(2000)1970)、最近ではPrを含む重い電子系超伝導体  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ (2006年日本物理学会(千葉大学

発表)の渦糸格子測定に成功していた。その研究の中から、渦糸が熱平衡にないときや、永久電流モード超伝導磁石磁場の減衰による磁場変化により、渦糸が運動すること、また、その運動をSTMで直接測定できることに着目。超伝導渦糸運動は、渦糸フロー電気抵抗測定、磁化の緩和測定が主たる研究手段として研究されてきた。STM測定により、渦糸運動をSTMで直接、実空間、実時間測定して、渦糸ダイナミクス研究の新展開を図ろうとするのが本研究計画である。

渦糸運動を可視化する方法は、電子顕微鏡、

走査マイクロホールプローブ法があるが、それぞれ 0.01T 程度以下の磁場、空間分解能はサブ  $\mu\text{m}$  等の測定限界がある。STM は、高磁場渦糸測定に適し（我々はすでに 15T で高温超伝導体渦糸実空間測定に成功していた）、空間分解能も原子長、また、磁場でなく局所準粒子状態を測定するという点で他の方法と全く異なる新情報を得ることができる。当時、STM を用いて、超伝導量子渦糸運動を測定している研究グループは、国内外を通じ、ライデン大学のグループが、4.2K、0.6T で 2H-NbSe<sub>2</sub> の渦糸運動を観測した 1 例のみであった。1 K 以下かつ 1 5 T の高磁場で実験可能なのは我々のみであり、第 2 種超伝導体応用に重要な高磁場下の渦糸運動、ピンギングの研究を、世界でリーダーシップをもって行い、新しい渦糸ダイナミクス像の構築が可能であると考へた。

## 2. 研究の目的

STM を用いて、次の課題を解決しようとした。

### (1) 渦糸ダイナミクスの微視的描像の確立

磁場勾配や電流により、超伝導量子渦糸に駆動力を与え、渦糸の運動を、直接 STM で測定、渦糸運動の微視的描像を確立する。それを、渦糸フロー抵抗や磁化測定から、推論されている渦糸運動の描像と比較する。

### (2) 銅酸化物高温超伝導体 Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>x</sub> の渦糸グラス融解の実空間測定

Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>x</sub> において、渦糸は、ピンギングの影響により高磁場、低温下でグラス状態をとり、温度を上げると 20K 程度の温度で、融解する。実空間・実時間測定により渦糸グラス融解の描像を確立する。一般のガラスの融解でその構成分子の動的挙動を直接観測することができるのは、この渦糸グラス系のみである。ガラス転移の原子レベルでのマイクロな実空間・実時間観測は、新しい試みで、高温超伝導体研究に新知見を与えらるとともに、一般にガラスの研究に新しいブレークスルーをもたらすと考へる。

### (3) 渦糸トラッキング STM 法開発

STM 法で走査速度を増し、高速で渦糸像を取得するのに、 piezo 素子の運動の限界があり、300nm 四方の STM 増撮を撮るのに、5 秒程度が限度になる。さらに、高速の渦糸運動を追うために、原子トラッキング STM 法を渦糸運動に適用し、渦糸追跡速度を 3-4 桁増大する試みに挑戦する。

## 3. 研究の方法

走査トンネル顕微鏡で超伝導渦糸を、高速走査により画像化し、それを連続的に行うことにより、渦糸運動を動画にする。また、

超伝導体の磁化測定により、ピンギング力の磁場依存性をバルクの測定から、見積もり、STM により得られた渦糸運動と比較する。300nm 四方を、約 10 秒で走査し、渦糸画像が得られている。これは、世界最速である。さらに、早い運動を測るために、原子トラッキング STM 法を、渦糸運動の追跡に適用する試みを行う。これが成功すると、ミリ秒の時間スケールでの渦糸の追跡が可能になる、初じめての試みに挑戦する。また、既存の極低温走査トンネル分光顕微鏡を改良して、0.1K 台の極低温で働くようにする。

## 4. 研究成果

### (1) YNi<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C における渦糸格子転位を媒介とする渦糸集団運動

YNi<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C の渦糸格子を、0.46K において、0.07T から 6 T の磁場下、STM により測定した。0.1T より大きな磁場では、四角渦糸格子が観測された。1 T の磁場から、渦糸格子に刃状転位が発生することを発見した。YNi<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C の磁化測定から、1 T 近辺からピニ

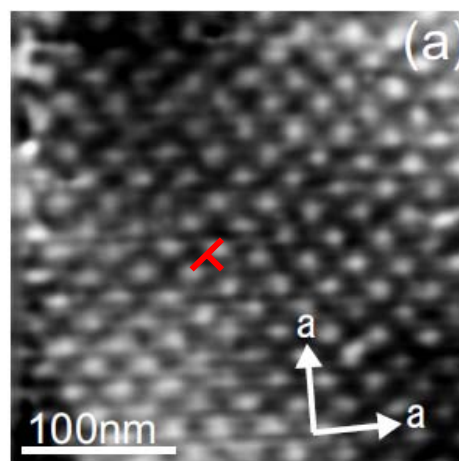


図 1 0.46K、4T における YNi<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C の渦糸像。刃状転位が見られる

ング力が急激に小さくなり、H<sub>c2</sub> 近辺で再度ピンギング力が強くなることがわかった。1 T 付近で、ピンギング力が小さくなる理由は、渦糸格子に転位が生ずるからであると結論付けることができた。渦糸格子の転位によるピンギング力低下を実験で示したはじめて示すことができた。図 1 に、4 T、0.46K における渦糸像を示す。

約 100 個の渦糸を含む渦糸格子像を 1 枚約 10 秒で、STM により画像化し、それを連続的に行うことにより、1 T から 4T の磁場下における渦糸集団運動を動画として測定することに成功し、その解析から渦糸集団運動は、転位が重要な役割を果たしていることを発見した。渦糸格子において、刃状転位のすべり面を延長すると、渦糸は長方形の領域に分けることができる。この長方形の領域が、

渦糸が集団運動を行う際の渦糸バンドルとなることが初めて明らかになった。渦糸格子に、磁場勾配があると渦糸格子に駆動力が働き、渦糸が運動を始めるが、そのとき、渦糸バンドルの境界が転位であり、隣り合う渦糸バンドルは、ずれあいながら、集団として運動してゆく様子が、STMで渦糸運動の動画か

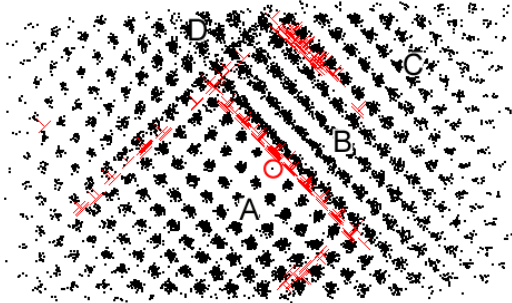


図2 転位の渦糸格子に対する相対的な位置。

ら明らかになった。図2に、その様子を示す、これは、90枚の渦糸STM像を、赤丸の渦糸を静止させ、それに対する他の渦糸位置をプロットしたものである。転位のすべり面を境界として、渦糸バンドルが形成されている、赤丸渦糸の属する渦糸バンドルAの渦糸は静止しており、それに接する渦糸バンドルBは、すべり面を堺にしてずれながら全体として運動することが示されている。渦糸格子に駆動力がかかるとき、一つの渦糸バンドル内の渦糸群は集団的に運動し、隣接する渦糸バンドルと転位面を境として、ずれ合いながら運動する。また、渦糸バンドル同士は、常にずれているわけではなく、複数のバンドルが同時に運動することもある。このように、渦糸格子の転位が、 $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$  ( $H_c2=9\text{T}$ )の渦糸集団運動に、重要な役割を果たすことが明らかになった。これは、ピンニング力が、1Tから減少するバルク測定の実験結果をも説明するものである。高磁場で渦糸運動の詳細を実空間・実時間測定から明らかにできたのは、この実験が最初である。さらに、広い温度範囲での測定により、微視的な観測から渦糸運動が明らかになると期待される。これらの結果は、

#### (2) 渦糸トラッキング STM

4.2Kにおいて $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$ の渦糸の運動を渦糸トラッキングSTMにより追跡しようとしたが、成功にいたっていない。理由は検討中であるが、渦糸の運動が連続的なものでなく、早い跳びの連続であった場合、渦糸トラッキング法は適用できない可能性もある。

#### (3) 銅酸化物高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ の渦糸グラス融解の実空間測定

15T、4.2Kにおいて $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ の渦糸測定に成功している。乱れた渦糸グラスが観測されるが、ところどころ、 $100\text{nm} \times 100\text{nm}$ 程度の領域では、正方格子を組む短距離秩序の渦糸格子が観測された。温度をあげて渦糸を観測すると、部分的に渦糸が融解している部分が測定された。この状況は、現在解析中である。

#### (4) 希釈冷却機 STM の改良

既存の希釈冷却機STMは、振動による雑音が大きいために欠点をもつものであったので、1Kプレート等の改良を行い、0.16K、8Tではたらく希釈冷却機STMに改良した、リークの問題があったが、現在、順調に運転が始まった。

#### 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)

[学会発表] (計 11 件)

① Nobuhiko Nishida: Vortex Bound States in Anisotropic Superconductors probed by Scanning Tunneling Spectroscopy (Invited Talk), NES Workshop: Probing Superconductivity at the Nanoscale, 4 June, (2008), Alicante, Spain

② 大塚洋輔、富田祐平、金子真一、西田信彦、アモルファス Nb 超伝導薄膜転移温度と上部臨界磁場の膜厚依存性、日本物理学会 (2008年秋季大会)、平成20年9月20日、岩手大学 (盛岡)

③ 山崎啓吾、鈴木慧、金子真一、竹屋浩幸、平田和人、西田信彦、空間反転対称性のない結晶構造をもつ超伝導体  $\text{Li}_2\text{Pt}_3\text{B}$  の走査トンネル分光、日本物理学会 (2008年秋季大会)、平成20年9月23日、岩手大学 (盛岡)

④ K. Matsuba, S. Yoshizawa, Y. Mochizuki, T. Mochiku, K. Hirata, and N. Nishida: High-Precision Scanning Tunneling Spectroscopy of Vortex Core in High Temperature Superconductor  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ ; 20<sup>th</sup>. Int. Symposium on Superconductivity (ISS2007) (Tsukuba, Japan, Nov. 5-7, 2007)

⑤ 西田信彦: 走査トンネル分光法による超伝導渦糸状態の研究; 東京大学物性研究所短期研究会「低温走査トンネル顕微鏡の現状と展望」2007年10月12-13日、東京大学物性研究所

⑥ Ken Matsuba, Shunsuke Yoshizawa, Yugo Mochizuki, Takashi Mochiku, Kazuto Hirata, and Nobuhiko Nishida: Atomic-resolution Scanning Tunneling Spectroscopy of Vortex Core States in Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>x</sub>; Spectroscopies in Novel Superconductors, (Sendai, Japan, Aug. 20-24, 2007)

⑦ N. Nishida, K. Matsuba, S. Yoshizawa, Y. Mochizuki, T. Mochiku, K. Hirata: Anti-phase Modulation of Electron- and Hole-like States in Vortex Core of Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>x</sub> revealed by Scanning Tunneling Spectroscopy; 5th. Int. Conf. On Vortex Matter in Nanostructured Superconductors (Rhodes, Greece, Sept. 8-14, 2007)

⑧ S. Kaneko, M. Furuyama, K. Takano, H. Sugawara, Y. Aoki, H. Sato, and N. Nishida: Vortex lattice symmetry in filled skutterudite compound PrOs<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub>; 5th. Int. Conf. On Vortex Matter in Nanostructured Superconductors (Rhodes, Greece, Sept. 8-14, 2007)

⑨ 金子真一, 高野浩史, 菅原仁, 青木勇二, 佐藤英行, 西田信彦: 走査トンネル分光法による PrOs<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub> の研究 II; 日本物理学会第 62 回年次大会 (北海道大学、2007 年 9 月 21-24 日)

⑩ 内山和治, 桑原陽, 鈴木慧, 金子真一, 竹屋浩幸, 平田和人, 西田信彦: 転位を媒介とした渦糸格子運動の実空間測定; 日本物理学会第 62 回年次大会 (北海道大学、2007 年 9 月 21-24 日)

⑪ 吉澤俊介, 松葉健, 望月勇吾, 茂筑高士, 平田和人, 西田信彦: Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>x</sub> 渦糸芯 STS 高精度測定; 日本物理学会第 62 回年次大会 (北海道大学、2007 年 9 月 21-24 日)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

西田 信彦 (NISHIDA NOBUHIKO)  
東京工業大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号：50126140

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

大熊 哲 (OKUMA SATOSHI)  
東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授