

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2007～2008

課題番号：19740194

研究課題名(和文) 異方的超伝導体のギャップ構造とジョセフソン磁束

研究課題名(英文) Superconducting gap structure and Josephson vortices
in an unconventional superconductor

研究代表者

安塚 周磨 (YASUZUKA SYUMA)

筑波大学・大学院数理物質科学研究科・講師

研究者番号：80382034

研究成果の概要：典型的な擬二次元有機超伝導体 κ -(ET)₂Cu(NCS)₂ のジョセフソン磁束フロー抵抗の面内磁場方位依存性を調べたところ、明瞭な四回対称性を見出した。 κ -(ET)₂Cu(NCS)₂ は *d* 波超伝導体であることから、磁束フロー抵抗の面内異方性と超伝導ギャップ構造との関係に興味をもたれる。ジョセフソン磁束フロー抵抗の磁場、温度、電流依存性を系統的に調べることにより、フロー抵抗の面内異方性と超伝導ギャップ構造の関係を検討した。

交付額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|----------|-----------|---------|-----------|
| 平成 19 年度 | 2,100,000 | 0 | 2,100,000 |
| 平成 20 年度 | 1,200,000 | 360,000 | 1,560,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,300,000 | 360,000 | 3,660,000 |

研究分野：物性物理

科研費の分科・細目：物理学・物性II

キーワード：強相関係

1. 研究開始当初の背景

異方的超伝導体の特徴は超伝導ギャップがゼロになる部分、つまり「ノード」が存在することである。このようなギャップ構造はクーパー対の起源と密接に関係しているため、その解明は超伝導の発現機構を知る上で重要な情報を与える。これまでに比熱、NMR、超音波吸収、磁場進入長、STM、熱伝導率の測定により超伝導ギャップ構造が議論されてきた。しかし、これらの実験を圧力下で行うことは非常に困難であり、しかも圧力下で数多くの異方的超伝導体が発見されていることから、圧力下において超伝導ギャップの

ノード方向を決定するための実験手法の確立が強く望まれてきた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、圧力下で出現する異方的超伝導体のギャップ構造を探る手段を検討することにある。この目的を達成するために、既にギャップ構造が明らかにされている擬二次元有機超伝導体 κ -(ET)₂Cu(NCS)₂ に注目し、圧力下でも測定可能なジョセフソン磁束フロー抵抗の面内異方性を詳細に検討した。

銅酸化物や有機物のように伝導層と絶縁層が交互に積み重なった二次元性の強い異

方的超伝導体では、磁場を伝導面と平行に印加するとジョセフソン磁束が形成される。このとき磁束の周りに流れている超伝導電流により準粒子エネルギーにドップラーシフトが生じるため、絶対零度においてさえもドップラー効果により準粒子が励起され、準粒子数はギャップ構造を反映して磁場方向に依存する。そのため運動しているジョセフソン磁束に対して準粒子によるエネルギー散逸もギャップ構造を反映して磁場方向とともに変化することが期待される。ドップラー効果により生じた準粒子がジョセフソン磁束のダイナミクスにどのような影響(特に散逸)を及ぼすかは未解明であるが、その解明は「圧力下における異方的超伝導体のギャップ構造解明の道」を切り拓く可能性を秘めている。

3. 研究の方法

平成 19 年度に構築した抵抗測定システムと物質・材料機構既設の 17 T 超伝導マグネットを用いて κ -(ET)₂Cu(NCS)₂ のジョセフソン磁束フロー抵抗の面内異方性を詳細に調べた。 κ -(ET)₂Cu(NCS)₂ は *bc* 面が二次元伝導面であり、面間方向 (*a** 方向) のコヒーレンス長は面間距離よりも短く、面間方向にはジョセフソン効果により結合している。この系に磁場を伝導面と平行に印加するとジョセフソン磁束が形成される。ジョセフソン磁束は電流を面間方向に流すことでローレンツ力により磁場と電流の両方に垂直な方向に運動する。ジョセフソン磁束の運動速度は磁束フロー抵抗に比例するので、磁束フロー抵抗の面内異方性を調べることでジョセフソン磁束ダイナミクスの面内異方性を調べることができる。

ジョセフソン磁束フロー抵抗の面内異方性を調べるためには、伝導面に対して高い精度で磁場方向を制御することが必要不可欠である。何故ならば、磁場方向が伝導面から数度ずれると、パンケーキ磁束とジョセフソン磁束が共存した交差格子が形成されジョセフソン磁束は強くピン止めされてしまうからである。高い精度で磁場方向を制御するために、本研究では NIMS 既設の二軸回転プローブを用いる。これにより極角 θ と方位角 ϕ をコントロールし、 0.05° という高精度で伝導面と平行に磁場を印加することができる。温度、磁場、磁場方向 (θ, ϕ) をパラメータとした系統的な磁束フロー抵抗測定をおこなった。

4. 研究成果

図 1 に抵抗の磁場方位依存性を示す。ここで、 $\theta(\phi)$ は *a**(*c*) 軸と磁場 *H* のなす角である。電流は伝導(*bc*)面と垂直に流している。 $\theta = 90^\circ$ で明瞭な peak 構造が観測される。これはジョセフソン磁束

のフロー抵抗によるものである。

図 2 にフロー抵抗の磁場方位依存性を示す。フロー抵抗は明瞭な 4 回対称性を示し、磁場の方向が *b* 軸および *c* 軸に一致したときに鋭い dip 構造が現れる。このことは、この方向に磁場を印加したときのみジョセフソン磁束の運動に対して何らかの強い散逸が生じていることを示唆する。

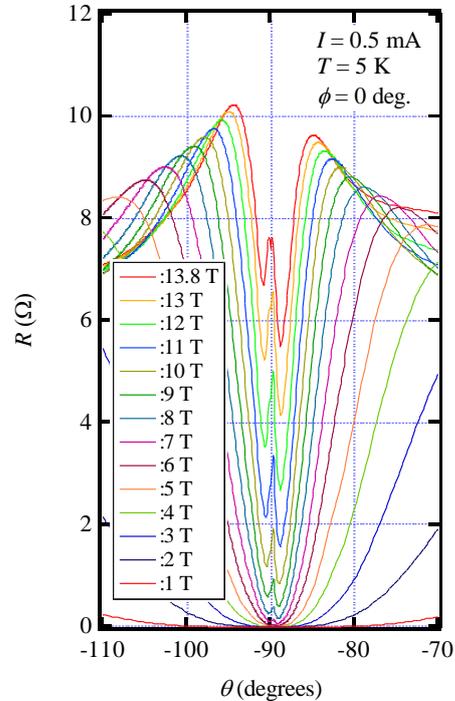


FIG. 1: Josephson-vortex flow resistance for κ -ET₂Cu(NCS)₂ under various magnetic fields

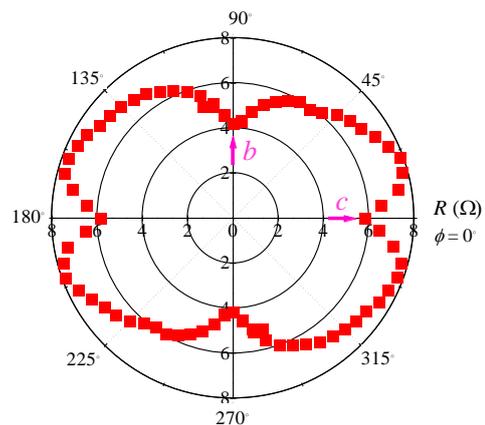


FIG. 2: Polar plots of Josephson vortex flow resistance in κ -(ET)₂Cu(NCS)₂ ($H = 13$ T, $T = 5$ K).

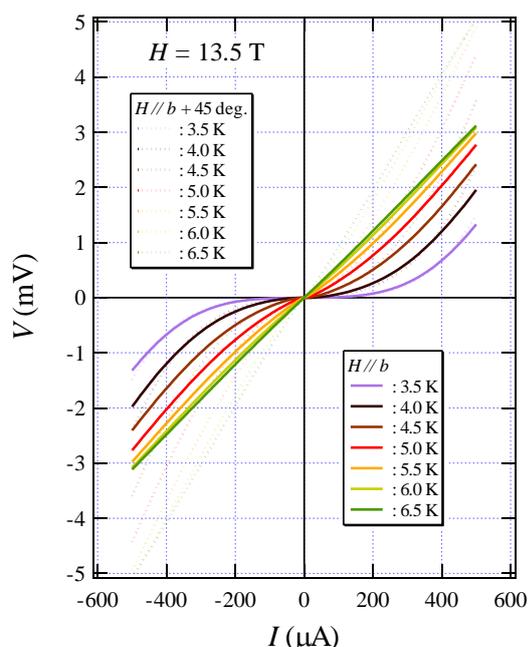


FIG. 3: I - V characteristics of Josephson vortex flow resistance in κ -(ET) $_2$ Cu(NCS) $_2$.

図3にフロー抵抗の電流電圧特性を示す。フロー抵抗は b 軸から45度ずれた方向に磁場を印加した場合に最大を示し、 c 軸、 b 軸の順に小さくなっていく。しかしながら、ジョセフソン磁束が動き始めるしきい電流は磁場方位にはあまり依存しない。このことは、ジョセフソン磁束は不純物等のピン止めにより動きにくくなっているのではなく、準粒子による散逸が重要な役割を担っている可能性を示唆する。

この超伝導体が d 波対称性をもつことから、超伝導ギャップのノード方向では多くの準粒子が存在し、それに比べて反ノード方向では準粒子数は少ないことが考えられる。準粒子が多いほどジョセフソン磁束は散逸を伴い動きにくくなることからフロー抵抗は小さくなることが予測される。フロー抵抗の4回対称性の起源は、この系の超伝導ギャップ構造と密接な関係があると考えられる。今後は定量的な検討が必要と考えられる。

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)

- [1] S. Yasuzuka and K. Murata, Recent progress in high-pressure studies on organic conductors, *Sci. Technol. Adv. Mater.* (2009) to be published. (査読有)

- [2] S. Yasuzuka, Y. Yamamura, W. Kaneko, M. Ohba, S. Kitagawa, and K. Saito, Heat Capacity of a Layered Molecule-Based Ferrimagnet $[\text{Mn}^{\text{II}}(\text{S-pnH})(\text{H}_2\text{O})][\text{Mn}^{\text{III}}(\text{CN})_6] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, *J. Phys. Soc. Jpn.* **78** (2009) to be published. (査読有)
- [3] M. Amano, Y. Yamamura, M. Sumita, S. Yasuzuka, H. Kawaji, T. Atake, and K. Saito, Calorimetric and dielectric study of organic ferroelectrics, phenazine-chloranilic acid, and its bromo analog, *J. Chem. Phys.* **130** (2009) 034503/1-7. (査読有)
- [4] S. Yasuzuka, H. Tanaka, M. Tokumoto, D. Graf, E. S. Choi, J. S. Brooks, H. Kobayashi, and A. Kobayashi, Highly Isotropic Magnetoresistance in a Single-Component Molecular Metal $[\text{Ni}(\text{tmdt})_2]$, *J. Phys. Soc. Jpn.* **77** (2008) 034709/1-5. (査読有)
- [5] T. Fujimoto, S. Yasuzuka, K. Yokogawa, H. Yoshino, T. Hayashi, H. Fujiwara, T. Sugimoto, and K. Murata, Evidence for Strong π - d Interaction in β -(EDT-DSDTFVSDS) $_2$ FeBr $_4$, *J. Phys. Soc. Jpn.* **77** (2008) 014704/1-7. (査読有)
- [6] S. Yasuzuka, K. Murata, T. Arimoto, and R. Kato, Temperature-Pressure Phase Diagram in TTF-TCNQ: Strong Suppression of Charge-Density-Wave State under Extremely High Pressure, *J. Phys. Soc. Jpn.* **76** (2007) 033701/1-4. (査読有)
- [学会発表] (計 5 件)
- [1] S. Yasuzuka, K. Saito, Y. Yamamura, W.

Kaneko, M. Ohba, S. Kitagawa, H. Sawa ,
Heat Capacity of Chiral Cyanide-Bridged
 $\text{Mn}^{\text{II}}\text{Mn}^{\text{III}}$ Ferrimagnet,
 $[\text{Mn}^{\text{II}}(\text{HL})(\text{H}_2\text{O})][\text{Mn}^{\text{III}}(\text{CN})_6] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, The
20th International Conference on Chemical
Thermodynamics, 8/3-8/8, 2008, Warsaw,
Poland.

- [2] S. Yasuzuka, S. Uji, T. Terashima, Y.
Yamamura, K. Saito, J. Yamada, Fourfold
Symmetry in Josephson-Vortex Flow
Resistance in Quasi-Two-Dimensional
Organic Superconductor $\kappa\text{-ET}_2\text{Cu}(\text{NCS})_2$,
The Sixth International Symposium on
Crystalline Organic Metals,
Superconductors and Ferromagnets, 9/24-29,
2007, Florida, USA.
- [3] 安塚周磨, 宇治進也, 寺嶋太一, 鴻池貴
子, 山村泰久, 齋藤一弥, 山田順一, 擬 2
次元有機超伝導体($\text{BEDT-TTF})_2\text{Cu}(\text{NCS})_2$
のジョセフソン磁束フロー抵抗におけ
る四回対称性, 第 16 回渦糸物理国内会
議 東京工業大学 2008 年 12 月 9 日
- [4] 安塚周磨, 山村泰久, 隅田真人, 齋藤一
弥, 兼子和佳子, 大場正昭, 北川進, 澤
博, キラル磁性体
 $[\text{Mn}(\text{HL})(\text{H}_2\text{O})][\text{Mn}(\text{CN})_6] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ の熱容量,
日本化学会 立教大学 2008 年 3 月 29 日
- [5] 安塚周磨, 宇治進也, 寺嶋太一, 鴻池貴
子, 山村泰久, 齋藤一弥, 山田順一, 擬 2
次元有機超伝導体($\text{ET})_2\text{Cu}(\text{NCS})_2$ のジョ
セフソン磁束フロー抵抗における四回
対称性, 日本物理学会 近畿大学 2007
年 9 月 26 日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安塚 周磨 (YASUZUKA SYUMA)

筑波大学・大学院数理物質科学研究科・講師

研究者番号：80382034

