

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24740246

研究課題名(和文) 強相関電子系における超伝導ゆらぎの異方的磁場効果

研究課題名(英文) Anisotropic magnetic field effect on fluctuating superconductivity in a strongly electron correlated system

研究代表者

土屋 聡 (Tsuchiya, Satoshi)

北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：80597633

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、高温超伝導現象解明の鍵を握る、超伝導位相ゆらぎを調べるため、超伝導転移温度(T_c)及び電子相関の違う4種類の超伝導体(有機化合物、銅酸化物)に対して電気抵抗と磁気トルク測定を行った。その結果、すべての物質で超伝導位相ゆらぎが観測された。また詳しい解析、比較から、位相ゆらぎは T_c の1.1~2倍程度高温から現れはじめ、電子構造の2次元性が強い程、強められる傾向があること、電子相関の強さに依らないことが明らかになった。これは超伝導ゆらぎの起源として電子構造の2次元性が関連していることを示唆するものである。

研究成果の概要(英文)：Recently, fluctuating superconductivity (FSC) have attracted attention because it will be one of the most intriguing interpretations of the pseudogap formation, which is likely an intrinsic property in strongly correlated two-dimensional (2D) superconductors. Although a number of experiments has been performed to reveal origin of FSC, it remains unclear so far. In this study, to investigate the origin, we have performed the resistance and magnetic torque measurements for four kinds of superconductors (organics and cuprates), which have different transition temperatures (T_c), electron correlation and dimensionality, respectively. As a result, the FSC was observed in all of the superconductors irrespective of the electron correlation strength and magnitude of T_c . Instead, the temperatures where the FSC appears, tended to enhance in the high 2D sample. Consequently, the origin of FSC can connect to dimensionality rather than the electron correlation and T_c .

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、物性

キーワード：超伝導ゆらぎ 強相関系超伝導 2次元性

1. 研究開始当初の背景

強相関電子系における超伝導現象を理解するにあたって重要な未解決問題の1つに超伝導転移温度 (T_c) における転移の性質の問題がある。一般にアルミニウム、鉛などの金属超伝導体では、温度を低温から上げていったとき、 T_c で超伝導ギャップが閉じると同時に、超伝導秩序パラメータの位相コヒーレンスがなくなる、BCS シナリオで転移が説明できる。一方で、電気伝導を担う電子間に強い電子相関 (クーロン相互作用) が働いている、強相関系超伝導体 (銅酸化物、有機化合物など) では、 T_c で有限のギャップを持つが、位相コヒーレンスのみがなくなる、位相無秩序化シナリオで転移が説明されることが近年の実験で指摘された。これらの実験結果によると、 T_c 以上では位相ゆらぎ超伝導状態が実現しており、また有効電子相関の強さが大きくなると、位相ゆらぎ状態が現れる温度領域も広がっている。これは位相ゆらぎ超伝導状態、転移には強い電子相関が深く関係していることを示唆している。

一方で銅酸化物超伝導体や有機超伝導体は2次元構造をしており、強電子相関という性質の他に、電子構造の2次元性という重要な性質がある。位相無秩序化シナリオによると、 T_c 以上では位相が時間的にも空間的にもゆらいでいると考えられている。この状態は熱的に励起されたボルテックスが自由に動き回っている描像と捉えることができ、転移が2次元系特有の Kosterlitz-Thouless(KT) 転移になっている可能性がある。また一般に次元が下がると、相互作用が2次元に限定されるため、位相が秩序化しづらくなる可能性も考えられる。よってこのような転移に対する系の2次元性の効果を調べるのが次の重要な課題である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、電子相関及び、2次元性の効果に着目し、強相関電子系超伝導における重要な未解決問題である、位相ゆらぎ超伝導の起源、転移の性質を明らかにすることである。特に申請者らはこれまで有機超伝導体 κ -(BEDT-TTF)₂Cu(NCS)₂ (κ -NCS) において、面内磁場中で電気抵抗測定と磁気トルク測定を行い、位相ゆらぎ超伝導状態を検出することに成功している。この方法を用い、電子相関、次元性の異なる様々な超伝導体に対して面内磁場中での電気抵抗、磁気トルクの系統的な精密測定を行い、電子相関及び、2次元性の効果に対する知見を得る。

3. 研究の方法

本研究では、位相ゆらぎ超伝導に対する電子相関効果を調べるため、 κ -NCS よりも有効電子相関の強い、

(1) κ -(BEDT-TTF)₂Cu(N(CN)₂)Br (κ -Br) を用い、電気抵抗測定と磁気トルク測定を行った。磁気トルク測定は、局所的にクーペペアが存在し、反磁性があればそれを精密に検出できる、位相ゆらぎ超伝導のプロープとして最も簡便で優れた手法である。

次に2次元性の効果を調べるため
(2) α -(BEDT-TTF)₂NH₄Hg(SCN)₄ (α -SCN)
(3) Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+x} (Bi2212) に対しても同様の測定を行った。 α -SCN は今回用いた試料の中で最も2次元性が強い物質であり、Bi2212 は κ -NCS よりも2次元性は弱い物質である。また α -SCN、 κ -NCS、Bi2212 の T_c はそれぞれ ~1K、~10K、~100K であり、位相ゆらぎ超伝導発現に対する熱ゆらぎの効果も調べることができる。

4. 研究成果(37行)

(1) κ -(BEDT-TTF)₂Cu(N(CN)₂)Br (κ -Br) κ -Br に対して、電気抵抗測定と磁気トルク測定を行い、温度-磁場相図を得ることに成功した (図1)。

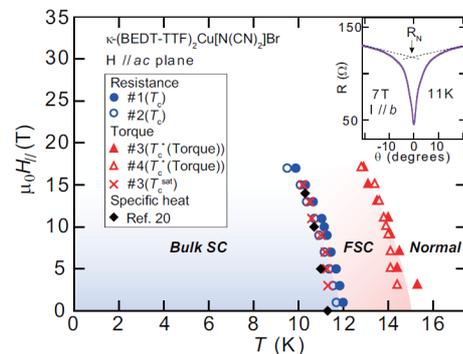


図1 : κ -Br の温度磁場相図。磁場は2次元面に平行に印加している。青丸は電気抵抗測定から決めた T_c 。赤三角は磁気トルク測定から決めた T_c をそれぞれ表す。

青丸は電気抵抗測定において、抵抗の低下が観測される温度 T_c であり、赤三角は磁気トルク測定において反磁性が現れ始める温度 T_c である。図から明らかなように、両者の値は大きく異なっている。これは電気抵抗測定では、位相コヒーレンスの確立したバルクの超伝導状態を観測し、磁気トルク測定では襲うコヒーレンスの無いゆらぎ超伝導状態を観測していると解釈することができる。またこの相図は κ -NCS の相図と非常によく似ていることもわかった。このことをさらに詳しく見るために、磁場ゼロの極限で位相ゆらぎ超伝導状態が現れる温度を有機超伝導体の圧力-温度相図にプロットした (図2)。 κ -Br と κ -NCS では圧力に応じて T_c も変化するが、その変化とほぼ同じ圧力依存性を示すことが明らか

になった。これは、位相ゆらぎ超伝導状態は電子相関に依らないことを強く示唆する結果である。

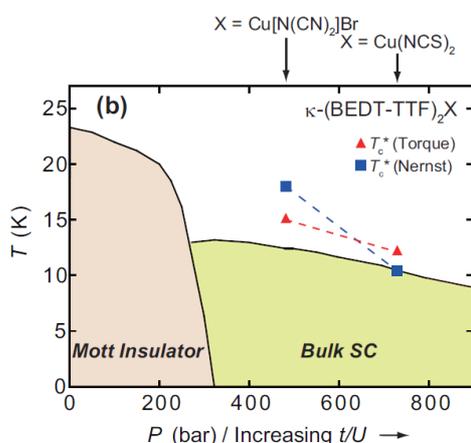


図 2 : κ -(BEDT-TTF)₂X の圧力温度相図。

κ -Br、 κ -NCS はそれぞれ矢印で示した圧力に対応する物質であり、圧力は有効電子相関 t/U に対応する。青四角はネルンスト効果によって決められた位相ゆらぎ超伝導状態が現れ始めるとされる温度。赤三角は今回磁気トルク測定から決めた超伝導ゆらぎが現れる温度。

(2) α -(BEDT-TTF)₂NH₄Hg(SCN)₄(α -SCN)

次に α -SCN に対しても同様の電気抵抗測定と磁気トルク測定を行い、 κ -Br と定性的に似通った温度-磁場相図を得ることに成功した。しかしながら、位相ゆらぎ超伝導状態が現れる温度領域は、 κ -Br よりも広がっていることがわかった。この結果は位相ゆらぎ超伝導の起源として、強い 2 次元性が関連していることを示唆するものである。

(3) Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+x}(Bi2212)

次に Bi2212 に対して、同様の電気抵抗測定と磁気トルク測定を行い、 κ -Br と定性的に似通った温度-磁場相図を得ることに成功した。位相ゆらぎ超伝導状態が現れる温度領域は、 κ -Br よりもわずかに狭くなっていることがわかった。Bi2212 は κ -Br よりも 2 次元性は弱い物質であるので、やはり次元性が関与していることを示唆する結果である。

また T_c の高さの観点から、 α -SCN、 κ -NCS、Bi2212 の 3 つの物質を比較してみると、 T_c が高いからと言って、位相ゆらぎ超伝導が現れる温度が高くなるということはない。これは位相ゆらぎ超伝導の起源が熱ゆらぎによるものではないことを示唆する結果である。

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 2 件)

1. S. Tsuchiya, J. Yamada, T. Terashima, N. Kurita, K. Kodama, K. Sugii and S. Uji
Title: Fluctuating superconductivity in the strongly correlated organic superconductor κ -(BEDT-TTF)₂Cu[N(CN)₂]Br
Journal of the Physical Society of Japan 82, 064711 (2013) (査読有り)
DOI: 10.7566/JPSJ.82.064711
2. S. Tsuchiya, J. Yamada, S. Tanda, K. Ichimura, T. Terashima, N. Kurita, K. Kodama, and S. Uji
Title: Fluctuating superconductivity under in-plane magnetic field for a strongly correlated two-dimensional organic superconductor
Physical Review B 85, 220506(R) (2012) (査読有り)
DOI: 10.1103/PhysRevB.85.220506

[学会発表](計 7 件)

1. S. Tsuchiya, K. Yamaya, S. Takayanagi, S. Tanda, K. Matsubayashi, Y. Uwatoko
Title: Pressure and magnetic field effect on the mixed bulk-filament superconductivity in ZrTe₃
The 69th Annual Meeting of JPS, Tokai University, Kanagawa, March 27, 2014
2. S. Tsuchiya, T. Mochiku, S. Ooi, K. Hirata, K. Sugii, T. Terashima, S. Uji
Title: Magnetic torque study on fluctuating superconductivity for Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+x}
The International Conference on Strongly Correlated Electron System, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, August 5-9, 2013
3. S. Tsuchiya, D. Fischer, K. Sugii, K. Miyagawa, K. Kanoda, H. Taniguchi, T. Terashima, and S. Uji
Title: Studies of fluctuating superconductivity for the organic superconductor α -(ET)₂NH₄Hg(SCN)₄
The 68th Annual Meeting of JPS, Hiroshima University, Hiroshima, March 26, 2013
4. S. Tsuchiya, D. Fischer, K. Sugii, K. Miyagawa, K. Kanoda, H. Taniguchi, T. Terashima, and S. Uji
Title: Systematic Studies of Fluctuating Superconductivity under

In-plane Magnetic Field for α - and κ -Type Organic Superconductors
International Symposium on Material Science Opened by Molecular Degree of Freedom, Miyazaki, Japan, December 1-4, 2012

5. S. Tsuchiya, J. Yamada, T. Terashima, K. Sugii, D. Graf, J. S. Brooks, and S. Uji
Title: FFLO state in the Organic Superconductor κ -(BEDT-TTF)₂Cu(NCS)₂ studied by Magnetic Torque
International School and Symposium on Molecular Materials and Devices, Durham, UK, September 22-29, 2012
6. S. Tsuchiya, T. Mochiku, S. Ooi, K. Hirata, T. Terashima, K. Sugii, S. Uji
Title: In-plane magnetic field effect on fluctuating superconductivity in Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+x}
The Autumn Meeting of JPS, Yokohama National University, Kanagawa, September 20, 2012
7. S. Tsuchiya, J. Yamada, T. Terashima, N. Kurita, K. Kodama, K. Sugii, D. Graf, J. S. Brooks, and S. Uji
Title: High-magnetic-field phase diagram of an organic superconductor κ -(BEDT-TTF)₂Cu(NCS)₂
International Conference on Science and Technology of Synthetic Metals 2012, Atlanta, USA, July 8-13, 2012

6. 研究組織

(1) 研究代表者

土屋 聡 (TSUCHIYA, Satoshi)
北海道大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号：80597633

(2) 研究分担者 なし
()

研究者番号：

(3) 連携研究者 なし
()

研究者番号：