

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月25日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K13837

研究課題名(和文)次世代高感度磁気トルク測定の構築と強相関電子系への応用

研究課題名(英文)Development of new torque magnetometry and its application to the strongly correlated electron systems

研究代表者

笠原 成 (Kasahara, Shigeru)

京都大学・理学研究科・助教

研究者番号：10425556

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：今日の凝縮系物理学において、物質の電子状態/磁気状態を如実に反映する磁化や磁化率の高精度測定は必要不可欠な実験技術である。本研究では、次世代の高感度磁気トルク測定システムの構築を行ない、更に、これを強相関電子系物質における電子状態解明へと展開することを目的とした。具体的には、新型のピエゾ抵抗式カンチレバーの検証測定を行なうとともに、銅酸化物超伝導体の擬ギャップ状態に関して、面内磁気トルクの精密測定に取り組んだ。熱力学量である磁気トルクにおいて有限の面内異方性の発達を観測し、擬ギャップ温度における電子ネマティック相転移の存在を明らかにすることに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

面内磁気トルクの超精密測定を行うことで、銅酸化物高温超伝導体の擬ギャップ状態において、電子ネマティック相転移、即ち、電子集団の自己組織化によって空間的に非対称な新しいタイプの秩序状態への相転移を起していることが明らかになった。これは物質中の電子集団が量子多体効果にもなって、ある種の液晶状態を形成していることを示したものである。本研究結果は銅酸化物高温超伝導体の発見以来、最大の謎とされる擬ギャップ状態の性質を明らかにしたものであり、学術的にも重要な意義をもつ。

研究成果の概要(英文)：Highly sensitive magnetic probes are one of the most important tools for the advanced condensed matter physics. Here, we examined newly developed miniature piezoresistive devices for the sensors of torque magnetometry. By using our exceptionally precise in-plane torque magnetometry, we found in the normal state of high-T_c cuprate superconductors that a spontaneous in-plane rotational symmetry breaking occurs at the onset temperature of the pseudogap, evidencing an electronic nematic transition. Our results shed new insight on the enigmatic pseudogap physics in cuprate superconductors.

研究分野：凝縮系物理学実験

キーワード：磁気トルク カンチレバー 回転対称性の破れ 銅酸化物高温超伝導体 擬ギャップ 電子ネマティック相転移 電荷液晶 量子液晶

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

今日の凝縮系物理学において、物質の電子状態、磁気状態を如実に反映する磁化や磁化率の高精度測定は必要不可欠な実験技術である。中でもピエゾ抵抗式カンチレバーを用いた磁気トルク測定は、原子間力顕微鏡(AFM) に使用される自己検知型マイクロカンチレバーを用いて抵抗ブリッジを組む事で簡単に磁気トルクの測定が可能であり、高磁場下において市販のSQUID磁束計を用いた磁気測定の数千倍という高感度測定が容易に可能なことから、数十 μ m角程度の微小単結晶に対してでも量子振動の観測、各種相転移の検出、更には、極めて小さな常磁性磁化率の異方性測定といった広範な精密物性測定に活用されてきた。この手法は、AFM用のピエゾ抵抗式カンチレバーを用いる簡便さと、その高い測定感度から、磁気トルク測定の世界標準となっていたが、AFM本来の用途においてピエゾ抵抗式は旧式であり、これまで広く使用されてきたセイコーインスツルメンツ社製自己検知型カンチレバーPRC120 およびPRC400 が2013年3月をもって製造終了となったことで永年入手不可能となってしまった。このため、新しいセンサーによる磁気トルク測定の確立が急務となっている。

2. 研究の目的

本研究では、これまで使用されてきたAFM用製自己検知型カンチレバーに代わる新たな磁気トルク測定の立ち上げを行い、これを強相関電子系の物性研究に適用することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 新型の磁気トルクセンサーとしてNANOSENSORS社製メンブレン型表面ストレスセンサー(MSS) SD-MSS-1KTM、およびSCL Sensortech社製ティップレスピエゾ抵抗式カンチレバー PRS-L450-F30-TL-STDを用いた磁気トルクのテスト測定を行った。

・Nanosensors社製MSS SD-MSS-1KTM

Nanosensors社製のメンブレン型表面ストレスセンサー (MSS)は、ガスセンサーとして開発されたものであるが、ごく最近、磁気トルク測定にも使用可能であることが報告され注目を集めている。MSSチップは、シリコンメンブレンと、これを支える4本の梁から構成されており、それぞれの梁にはピエゾ抵抗が組み込まれた形になっている。同社ではガスセンサーであるSD-MSS-1K(図1左)をベースにして、新たに磁気トルク測定に特化したSD-MSS-1KTM(図1中)の開発を行っているところにある。このセンサーはメンブレンを支える梁が長く、更には、それぞれの梁が曲げ、およびねじり応力に対する感度を有していることが特徴となっている。今回、Nanosensors社の協力の下でMSS SD-MSS-1KTMのテスト測定を行った。

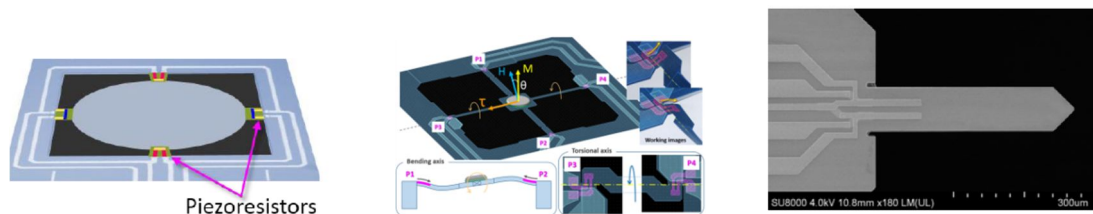


図1. (左) Nanosensors社製MSS SD-MSS-1K, (中) 同社MSS SD-MSS-1KTM, (右) SCL Sensortech社製PRS-L450-F30-TL-STD (いずれも各社製品情報による)

・SCL Sensortech社製ティップレスピエゾ抵抗式カンチレバー PRS-L450-F30-TL-STD

SCL Sensortech社では、AFM用カンチレバーとは異なり先端にティップを有さない構造のカンチレバーを製造しており、カンチレバー先端に単結晶試料を設置するのに適した仕様となっている(図1右)。従来磁気トルク測定に用いられてきたセイコーインスツルメンツ社製のピエゾ抵抗式自己検知型カンチレバーと構造的に近いものとなっている。その一方、セイコーインスツルメンツ社製のカンチレバーでは、カンチレバーを組み込む形で抵抗ブリッジ回路を組み、レバーの曲げに対するピエゾ抵抗の変化を抜き出す必要があったが、SCL sensortech社製の同カンチレバーは、一つの基板上に抵抗ブリッジ回路が組み込まれた形になっており、これによって簡単に磁気トルク測定が可能な仕様となっている。

(2) 新型センサーのテスト測定に加え、これらと並行して強相関電子系での実験を進め、特に、銅酸化物超伝導体の擬ギャップ状態に関して、磁気トルクの精密面内磁場測定を系統的に行うことで、擬ギャップ状態が面内回転対称性の破れに伴った電子ネマティック相であるか否かの熱力学的検証を行った。

4. 研究成果

(1) 新型センサーの検証

Nanosensors 社製 MSS SD-MSS-1KTM、および SCL Sensortech 社製 PRS-L450-F30-TL-STD について検証を行い、両者ともに数百 μm 角程度の試料の応答を確認した。新型センサーは、その構造に由来して、それぞれに適する磁気トルク測定がある。まず MSS においては、4本の梁がそれぞれに曲げ、および捻じれの応力に敏感に検知することから、全方向に敏感な磁気トルク測定となる。一方、カンチレバー式の場合、レバーの二次元的な曲がり応力のみが敏感な測定となる。どちらのセンサーが好ましいかは磁気トルク測定によってどのような物理的な情報を引き出したいかに依存する。MSS の場合は、量子振動測定など、磁気トルクの全成分をとらえたい測定に有利であり、一方、カンチレバー型の場合、磁気異方性を精密に測定する目的に適していると考えられる。これはレバーが二次元的なしなりのみの自由度を有しており、このためにレバーの二次元変位面に垂直な方向のトルク成分のみが選択的に測定されるためである。従って、面内磁気トルク測定など、帯磁率の異方性を正確に測定するような場合、磁場印加方向を結晶面に正確にコントロールすることによって、面間成分の混入が起きることなく磁気異方性を測定することが可能となる。これら新型センサーにおける磁気トルクの絶対値の見積もりについては、バネ乗数の固体値にセンサーごとのばらつきがあり、今後の課題として残る。

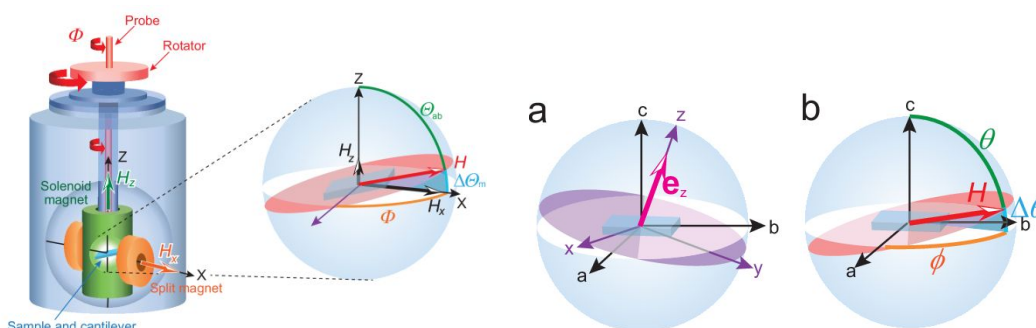


図 2. 面内磁気トルク測定における測定系およびカンチレバーにより検出される磁気トルクの模式図。

(2) 銅酸化物高温超伝導体の擬ギャップ状態における回転対称性の破れ

強相関電子系における長年の重要問題である銅酸化物超伝導体の擬ギャップ状態について、磁気トルクの高感度測定を通じて、これが回転対称性の自発的破れで特徴づけられる熱力学的秩序相であるかの検証に取り組んだ。銅酸化物の擬ギャップ状態では、電子系が自発的に回転対称性を破る可能性が、熱電係数測定などから指摘されているが、これが熱力学的秩序相であるのか、或いは何等かの揺らぎであるのかについては当該分野の重要問題として大きな論争の中にある。またこれまでの研究では擬ギャップの出現温度自体が未だに確定せずに、実験手法や物質によって異なる混沌とした状況が続いている。

本研究では純良単結晶が得られる $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+d}$ (YBCO) 単結晶について異なるホールドープ量の試料での磁気トルク測定に系統的に取り組み、直方晶由来の磁気異方性とは異なった電子ネマティック相転移に由来する回転対称性の破れを明らかにすることに成功した [Y. Sato *et al.*, *Nature Phys.* (2017)]. 本研究結果は銅酸化物超伝導体の相図の理解において極めて重要な結果であると考えられる。

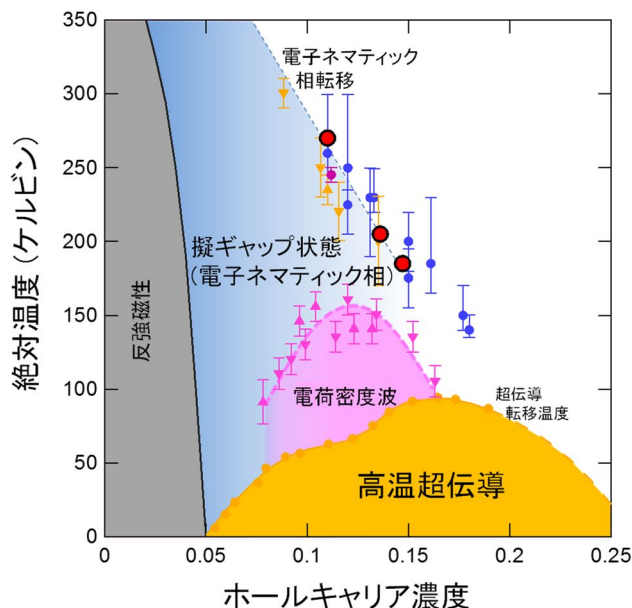


図 3. 銅酸化物高温超伝導体 YBCO の温度 - キャリア濃度相図. 擬ギャップ温度 T^* において回転対称性が自発的に破れる電子ネマティック相への相転移がおきていることが磁気トルクの面内精密測定により明らかになった.

更に、YBCO 同様に純な単結晶試料が得られ、他方、多くの銅酸化物高温超伝導体とは異なり正方晶構造を有する Hg1201 系においても磁気トルクの高感度測定に取り組んだ。YBCO と同様に相図上の異なるホールドーピング量に対する測定を行うため、酸素雰囲気下において試料をアニールし、系統的に酸素量を制御した試料の測定を進め、ネマティック転移の系統的な変化を調べたところ、擬ギャップ温度以下において有限の面内異方性が発達する電子ネマティック相転移が明らかになった。特に重要な点として Hg1201 では Cu-O-Cu のボンド方向から 45 度傾いた B_{2g} 対称性をもったネマティシティが発達しており、これは $YBa_2Cu_3O_{6+d}$ で観測されている B_{1g} 対称性をもったボンド方向へのネマティシティとは明確に異なるものであることが明らかになった。更に Hg1201 では低温で電荷密度波状態が形成されるに伴って、ネマティシティの発達が抑制される振る舞いが見られた。これは擬ギャップ状態と電荷密度波が競合関係にあることを示しており、擬ギャップ状態の起源が電荷密度波のそれとは異なることを示唆する。一連の結果は、擬ギャップ状態の微視的起源を明らかにする上で極めて重要な結果と考えられる。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6 件)

- (1) T. Hanaguri, **S. Kasahara**, J. Böker, I. Eremin, T. Shibauchi, and Y. Matsuda, "Quantum vortex core and missing pseudogap in the multi-band BCS-BEC-crossover superconductor FeSe", *Phys. Rev. Lett.* **122**, 077001 (2019).
- (2) S. Licciardello, J. Buhot, J. Lu, J. Ayres, **S. Kasahara**, Y. Matsuda, T. Shibauchi, N. E. Hussey, "Electrical resistivity across a nematic quantum critical point", *Nature* **567**, 213–217 (2019).
- (3) A. I. Coldea, S. F. Blake, **S. Kasahara**, A. A. Haghighirad, M. D. Watson, W. Knafo, E. S. Choi, A. McCollam, T. Yamashita, Y. Matsuda, M. Bruma, S. Speller, T. Wolf, T. Shibauchi, and A. J. Schofield, "Evolution of the Fermi Surface of the Nematic Superconductors $FeSe_{1-x}S_x$ ", *npj Quantum Materials* **4**, 2 (2019).
- (4) T. Hanaguri, K. Iwaya, Y. Kohsaka, T. Machida, T. Watashige, **S. Kasahara**, T. Shibauchi, Y. Matsuda, "Two distinct superconducting pairing states divided by the nematic end point in $FeSe_{1-x}S_x$ ", *Science Advances* **4**, eaar6419 (2018).
- (5) Y. Sato, **S. Kasahara**, T. Taniguchi, X.Z. Xing, Y. Kasahara, Y. Tokiwa, Y. Yamakawa, H. Kontani,

T. Shibauchi, and Y. Matsuda, "Abrupt change of the superconducting gap structure at the nematic critical point in $\text{FeSe}_{1-x}\text{S}_x$ ", *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **115**, 1227-1231 (2018).

- (6) Y. Sato, **S. Kasahara**, H. Murayama, Y. Kasahara, E.-G. Moon, T. Nishizaki, T. Loew, J. Porras, B. Keimer, T. Shibauchi, Y. Matsuda, "Thermodynamic evidence for nematic phase transition at the onset of pseudogap in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ ", *Nature Phys.* **13**, 1074-1078 (2017).

[学会発表](計 6 件)

- (1) "Nematic Phase Transition at the Onset of Pseudogap in Cuprates",
S. Kasahara, Plasma 2019 Workshop, Jan. 18- 21, 2018. Univ. Central Florida, Orlando, FL, USA.
- (2) "Nematic transition at the onset of pseudogap in cuprates",
S. Kasahara, The 12th International Conference on Ceramic Materials Components for Energy and Environmental Applications (CMCEE-2018), Jul. 22-27, 2018, Suntec, Singapore.
- (3) "Nematic transition at the onset of pseudogap in cuprates",
S. Kasahara, International Workshop on Recent Progress in Superconductivity, Jul. 13-15, 2018, Peyongchang, Korea.
- (4) "銅酸化物高温超伝導体における新奇なネマティシティ",
笠原 成 京都大学基礎物理学研究所研究会「多自由度電子状態と電子相関が生み出す新奇超伝導の物理」, 2018 年 5 月 7-9 日, 京都大学, 京都市.
- (5) "Nematic transition at the onset of pseudogap in cuprates",
S. Kasahara, 2017 International Symposium on Superconductivity, Dec. 13-15, (2017). Tokyo, Japan.
- (6) "ネマティック秩序と非従来型超伝導",
笠原 成, 京都大学基礎物理学研究所研究会「超伝導研究の最先端: 多自由度、非平衡、電子相関、トポロジー、人工制御」, 2017 年 6 月, 京都大学, 京都市。〔その他〕

ホームページ等

<http://kotai2.scphys.kyoto-u.ac.jp/member/kasa/kasa.html>

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

6 . 研究組織

(1)研究代表者

笠原 成 (KASAHARA, Shigeru)
京都大学大学院理学研究科
物理学・宇宙物理学専攻 助教
研究者番号：10425556

(2)研究分担者

なし

(3)研究協力者

なし