

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K17737

研究課題名(和文)量子ゆらぎがもたらす高温超伝導前駆現象の解明

研究課題名(英文) Investigation of precursor phenomenon of high temperature superconductivity induced by quantum fluctuation

研究代表者

中村 大輔 (Nakamura, Daisuke)

東京大学・物性研究所・助教

研究者番号：70613628

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：高温超伝導体の超強磁場物性を調べることを目的とした、テラヘルツ領域の電気伝導度測定を行うため、購入したZnTe結晶と既存のチタンサファイアレーザーを用いて、測定系の構築に取り組んだ。しかし、チタンサファイアレーザーの経年劣化により、装置のメンテナンスを継続中である。これに並行して、数百MHz程度の高周波信号を用いた、非接触電気伝導度測定システムを開発することに成功した。これによって、当初の目的であった高温超伝導体の超強磁場物性を測定できるようになった。典型的な高温超伝導体であるLaSrCuO4の上部臨界磁場測定を行い、パウリ常磁性が超伝導対破壊に寄与する事を示した。

研究成果の概要(英文)：The high-frequency terahertz electrical conductivity measurement of high-temperature superconductors is planned. Using ZnTe crystal and Ti:Sapphire laser, the measurement system is developed. Due to the aging of the laser, the maintenance of the measurement system has been continued.

In parallel, I succeed the development of the high-frequency contactless electrical conductivity measurement system, using the radio frequency (~800 MHz) voltage as a probe signal. Using this instrument, the high-field property of the high-temperature superconductor was investigated. The upper critical field of one of the typical cuprate superconductor, La<sub>1.86</sub>Sr<sub>0.16</sub>Cu<sub>4</sub>, was investigated. I clarified that the Pauli paramagnetic effect dominates the pair-breaking of superconductivity under high magnetic fields at low temperatures.

研究分野：固体物性

キーワード：高温超伝導 超強磁場 電気伝導度 テラヘルツ

### 1. 研究開始当初の背景

100 テスラを超える極限超強磁場は「一巻きコイル法」(~300 テスラ)や「電磁濃縮法」(~1000 テスラ)といったマグネットコイルの破壊を伴う特殊な手法によって発生することができ、物性研究所では 1970 年代より物性研究応用に向けた開発に取り組んでいる。しかし、数マイクロ秒という短い磁場発生時間、磁場発生に伴う電磁ノイズ、ボア径数 mm という空間的制約、といった技術的困難から、物性測定の手法は限定されてしまう。現在、研究の主力となっているのは電磁ノイズの影響を受けにくい磁気光学測定や、磁場の挿引速度が早いことを利用した誘導法による磁化測定である。これらの手法により、スピン物性を中心とした研究が超強磁場下で展開されている。

一方で、超強磁場中での電子物性の研究はその重要性に着目されてはいたものの、研究の進みは遅かった。金属的物質に対する研究の基本となる 4 端子電気伝導度測定では、試料付近のリード線にループができるためにノイズや磁束変化に起因する誘導起電力が発生し、試料からの信号を覆い隠してしまう。そのため、高周波の電磁波を用いた非接触型の電気伝導度測定法が有用である。物性研究所では、測定試料を 1 対のコイルで挟んで透過した電磁波の強度をモニターする「透過型」の手法が開発され、銅酸化物高温超伝導体 YBCO の上部臨界磁場が測定された。

しかし、超強磁場領域における金属的物質の物性研究には、まだいくつかの課題があった。すなわち、透過型配置では信号強度が測定試料の表皮深さによって決まるため、電気伝導度の大きい試料に対しては試料厚みを極端に小さくしなければならず、物質によっては困難である。さらに、クライオスタットを含めたプローブ周りのサイズをあまり小さくすることができず、電磁濃縮法では最大磁場に到達する前に測定プローブの破壊が起こってしまう。プローブコイルを 1 つしか用いない「反射型」配置では測定プローブ全体を小さくでき、電気伝導度の大きい物質に対しても感度を有するが、電気伝導度の絶対値の算出が難しく、半定量的な物性研究にとどまっている。

### 2. 研究の目的

(1) 100 テスラ以上での精度良い電気伝導度測定を可能にするために、新しい手法を用いた計測システムを開発する。100 テスラ以下の非破壊パルスマグネットが開発された、高周波共振回路を利用した計測システムをさらに発展させることにより実現する。

(2) 高温超伝導体の超強磁場物性を調べることを目的とする。具体的には、上部臨界磁場などの強磁場特有の現象を調べることによって、高温超伝導発現機構の解明へ新しい視点からのアプローチを行う。

### 3. 研究の方法

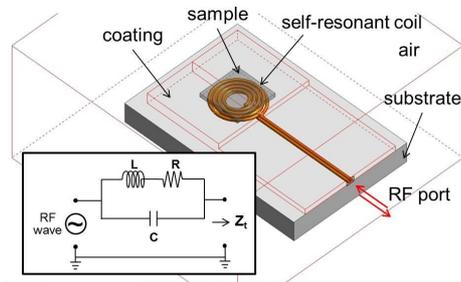


図 1 : 開発した測定プローブ(自己共振コイル)の模式図。

(1) 非接触型の高周波電気伝導度測定システムを構築した。本研究で新しく開発した上記の「自己共振コイル法(図 1)」によって、100 テスラ以上の超強磁場領域において精度良い電気伝導度測定が可能になった。研究当初は、超伝導ギャップエネルギーに相当するテラヘルツ領域の高周波電気伝導測定を行うべく測定系の構築を始めたが、現有のレーザーの経年劣化による装置のメンテナンスに時間を費やしたために、並行して周波数の低いラジオ波領域の電磁波を用いた電気伝導度測定システムを構築した。渦巻き状に設計された自己共振コイル(図 1)は、インダクタンスとワイヤの抵抗、そしてワイヤ間の浮遊容量によって外部素子として負性抵抗などの素子を使用することなく共振回路を形成することができる。そのため、共振周波数(数百 MHz 程度)付近の高周波プローブ信号の反射スペクトルが、プローブ上においた試料の電気伝導度を反映して急峻に変化することを利用している。

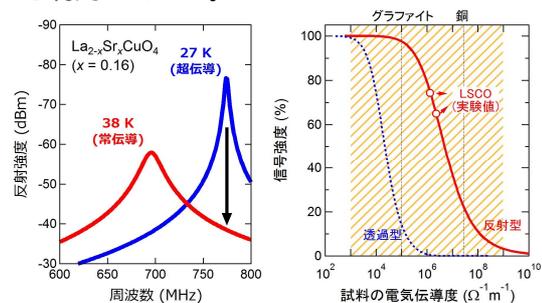


図 2 : (左)高温超伝導体  $\text{La}_{1.84}\text{Sr}_{0.16}\text{CuO}_4$  の反射スペクトルの温度依存性。(右)信号強度から試料の電気伝導度への変換曲線。

開発した測定装置のデモンストレーションとして、代表的な銅酸化物高温超伝導体の一種である  $\text{La}_{1.84}\text{Sr}_{0.16}\text{CuO}_4$  (以下、LSCO と表記) の電気伝導特性を調べた。図 2 左は超伝導転移温度  $T_c$  付近での反射スペクトルの温度変化を示したものである。LSCO 試料が超伝導状態から常伝導状態になると、電気伝導度の変化を反映して共振周波数が大きく減少していることがわかる。磁場下での測定では、測定信号の周波数を超伝導状態における共振

周波数に固定することによって、試料が上部臨界磁場( $B_{c2}$ )以上で常伝導状態に戻ると、信号の反射強度がゼロ磁場での常伝導状態の値付近にまで変化することが予測される(図2左の黒矢印)。

(2) 非接触型の電気伝導度測定では、試料の電気伝導度の絶対値を算出するのが困難であるという課題があった。電気伝導度を算出するために、有限要素法ソフトウェアを使ってプローブコイルの電磁界解析を行い、反射信号強度から試料の電気伝導度への変換のマスターカーブを算出した。ゼロ磁場での反射信号強度の温度依存性ととの比較により、図2右実線に示すような反射型配置での変換曲線を得た。相補的手法である透過型配置での変換曲線(測定信号500MHzを仮定、破線)と併せると、実に6桁もの広い電気伝導度の範囲で測定感度を有するということがわかる。これは、半金属から金属まで、現代の物性物理において研究されているほとんどの物質が示す電気伝導度の値をカバーしていると言える。

#### 4. 研究成果

開発した電気伝導度測定装置を用いて、銅酸化物高温超伝導体 LSCO 単結晶の上部臨界磁場( $B_{c2}$ )測定を試みた。この物質は超伝導転移温度  $T_c \sim 37\text{K}$  を有し、 $\text{CuO}_2$  面(ab 面)が電気伝導を担う2次元超伝導体である。クーパ対の破壊による臨界磁場は、超伝導体中に侵入した磁束周りの電子の軌道効果(2次転移)とパウリ常磁性の効果(1次転移)により決まる。磁場が銅酸化物高温超伝導体の  $\text{CuO}_2$  面に平行な配置( $B//ab$ )においては、磁束が  $\text{CuO}_2$  面間の絶縁層に侵入し安定化するため、軌道による対破壊が抑制されてパウリ常磁性により超伝導が破れると考えられている。しかし、 $B_{c2}$  が通常の実験室で得られる磁場範囲を大きく超えるために、低温に置いて  $B_{c2}$  近傍の超伝導特性を実験的に調べた例はほとんどない。

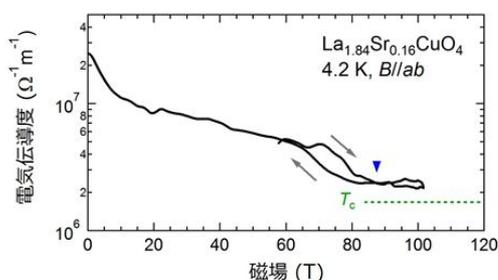


図3: LSCO 単結晶の電気伝導度の磁場依存性。

図3は一巻きコイル法によって発生した103Tまでの磁場下での、LSCO 単結晶の電気伝導度の磁場依存性である。点線はゼロ磁場での  $T_c$  直上における電気伝導度の値を示している。磁場の増加とともに LSCO 試料の電気伝導度が減少し、ヒステリシスを伴って

85Tにおいて飽和している(青下三角)。この時の電気伝導度の値はほぼゼロ磁場での常伝導状態の値であることから、 $B_{c2}$ に到達したと判断できる。上部臨界磁場においてヒステリシスが生じることは、超伝導が破壊される機構がパウリ常磁性によって生じていることを示唆している結果であり、LSCOにおいて初めて発見することに成功した。

また、上部臨界磁場の温度依存性を既存のモデルと比較することによって、上部臨界磁場において一次相転移が生じるのは、単にパウリ常磁性の効果が大きいためではなく、スピン軌道相互作用が比較的小さい事も重要であることを明らかにした。銅酸化物高温超伝導体では、電気伝導を担う  $\text{CuO}_2$  面の原子が波打った構造を取ることで(バックリング)によって、Rashba型のスピン軌道相互作用が生じる。バックリングの寄与が大きいことに知られる銅酸化物高温超伝導体 YBCO では、量子振動の実験などによりスピン軌道相互作用の存在が実証されている。一方で、LSCOではバックリングの寄与が小さいことが結晶構造解析によって報告されている。このことから、LSCOは小さなバックリング角によってスピン軌道相互作用が小さくなり、結果として上部臨界磁場における一次相転移が観測されたと推察できた。

#### 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)

[雑誌論文](計 1 件)

D. Nakamura, M. M. Altarawneh, and S. Takeyama, Radio frequency self-resonant coil for contactless AC-conductivity in 100 T class ultra-strong pulse magnetic fields, Meas. Sci. Technol., 査読有, Vol. 29, 2018, p.035901, <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6501/aa9a0b>

[学会発表](計 2 件)

中村大輔, M. M. Altarawneh, 嶽山正二郎, 「100 テスラを超える超強磁場領域での高温超伝導体の上部臨界磁場測定」, つくば-柏-本郷 超伝導かけしプロジェクトワークショップ, 2018年3月26-27日, 物質・材料研究機構

中村大輔, M. M. Altarawneh, 嶽山正二郎, 「破壊型マグネット領域での高周波電気伝導度測定」, 強磁場コラボラトリーが拓く未踏計測領域への挑戦と物質・材料科学の最先端, 2016年11月29-30日, 物質・材料研究機構

[その他]

ホームページ等

<http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/news2.html?pid=3167>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

中村大輔 (NAKAMURA, Daisuke)

東京大学・物性研究所・助教

研究者番号：70613628

(4)研究協力者

嶽山正二郎 (TAKEYAMA, Shojiro)

東京大学・物性研究所・教授

研究者番号：20163446