

平成 21 年 5 月 29 日現在

研究種目：若手研究（スタートアップ）

研究期間：2007-2008

課題番号：19840052

研究課題名（和文） 超伝導体における電流揺らぎのナノスケール直接解像

研究課題名（英文） Direct nanoscale imaging of current fluctuation in superconductors

研究代表者

幸坂 祐生 (KOHSAKA YUHKI)

独立行政法人理化学研究所・高木磁性研究室・基礎科学特別研究員

研究者番号 80455344

研究成果の概要：

本研究では、銅酸化物高温超伝導体における特異な電子対状態の直接観測を目的とした。 $\text{Ca}_{2-x}\text{Na}_x\text{CuO}_2\text{Cl}_2$  を試料として用い、走査型トンネル顕微鏡法/分光法を用いた分光イメージングにより、キャリアドーピングに伴う絶縁体から超伝導体への電子相の発達過程を精密測定した。その結果、励起スペクトルにおける擬ギャップの形成と局所的な電子状態の対称性の変化に直接的な対応関係があることを見出した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,350,000	0	1,350,000
2008 年度	1,350,000	405,000	1,755,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,700,000	405,000	3,105,000

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：物性実験・低温物性・強相関電子系・高温超伝導・走査トンネル顕微鏡

## 1. 研究開始当初の背景

超伝導現象は、位相の揃ったコヒーレントな電子対の存在によって特徴付けられる。

Bardeen-Cooper-Schrieffer 理論によって説明される従来型超伝導体においては、電子対は生成と同時に位相の揃った状態へと凝集することが知られている。また、電子対の生成に対応して、電子励起スペクトルにはエネルギーギャップが生じる。そのため、エネルギーギャップは超伝導のよい指標とみなされてきた。

銅酸化物高温超伝導においては、現象の発見から 20 年以上が経つが、電子対の形成機構についての統一見解が得られておらず、物性物理学における大きな課題となっている。銅酸化物高温超伝導におけるエネルギーギャップは、その大きさが超伝導転移温度に比べて非常に大きく、数ナノメートルで空間変調を示し、超伝導転移温度以上から観測されるという従来型の超伝導にはない特徴を持つ。これは、擬ギャップと呼ばれ、電子対形成機構との関連から大きな注目を集めてきた。擬ギャップの起源もまた明らかになっていないが、原因としては、インコヒーレントな電子対や電子対密度波などが議論されてきた。

## 2. 研究の目的

本研究においては、擬ギャップに関連して存在が議論されてきた銅酸化物高温超伝導体における特異な電子対状態の可能性を探索し、分光イメージング測定によってその直接的な実験的知見を得ることを目的とした。

銅酸化物における超伝導状態それ自体は、第 II 種超伝導体として、定性的には従来型超伝導とよく似た性質を示す。一方、擬ギャップ状態など超伝導状態の辺縁部に銅酸化物高温超伝導体に特徴的な現象が現れることが知られている。そこで、本研究においてはキャリアドーピングにより超伝導が発達する過程を精査することを試みた。このような実験は、これまでには実行上の困難のためにほとんど行われてこなかった。しかし、温度を上げる・磁場を印加する必要がないことから解釈が容易な情報を高い分解能で得ることに適している。こうした新たな測定を通して得られる知見により、銅酸化物における高温超伝導を担う電子対に特有な事象を明らかにし、超伝導発現の機構解明に寄与することを目指した。

## 3. 研究の方法

本研究が対象とするナノメートル程度で空間変化する電子状態の探索には、原子分解能を有する分光手法である走査型トンネル顕微鏡法/分光法 (STM/STS) が極めて有用である。実際の測定は、理化学研究所に設置された高安定度超高真空低温 STM を用いて行った。この STM は 0.4-60K の温度範囲、11T までの強磁場下で数日間にわたって安定した (ドリフト 0.1nm/day 以下) 電子状態イメージング可能な装置である。このような極めて安定した装置は本研究が目指す精密測定に欠かせない。

試料としては、優れたへき開性を示す  $\text{Ca}_{2-x}\text{Na}_x\text{CuO}_2\text{Cl}_2$  を用いた。へき開によって得られる表面は清浄かつ原子レベルで平坦であるため、STM/STS に特に適している。また、この物質は、絶縁相と超伝導相の両方の組成で単結晶が得られるため、超伝導に関連した現象の萌芽を探索するのに非常に適している。このような性質を併せ持つ物質の選択が、これまでにはほとんど行われてこなかった測定を可能にした。

STM/STS を用いた電子状態の分光イメージング研究はこれまでも行われてきた。ここで注意すべき点は、(従来型超伝導とは異なり) 銅酸化物高温超伝導においては、エネルギーギャップと電子対の関連は必ずしも明らかではないことである。これは、擬ギャップに関する議論が収束していない点からも示唆される。そこで本研究では、電子対状態に関する新たな知見を得るために、電流揺らぎの測定を検討した。また、擬ギャップについての分光学的測定があまり行われてこなかった絶縁体に近いキャリア濃度領域での研究を行った。

## 4. 研究成果

本研究で必要となる精密測定を可能にするための必須要素として、清浄試料表面を作製・保持するための超高真空装置の設計・作製を行った。必要機能及び使用形態を吟味した設計をすることで、装置をできるだけ小さく保つことを実現した。これは装置全体の安定度を高める上で重要である。

得られるデータの質は、装置だけではなく、試料表面と探針先端形状に極めて敏感に依

存する。特に、結晶格子よりも小さな構造の探索には原子レベルで鋭い探針が不可欠である。そのため、これらを安定して得られるようにするための準備方法を探索した。これは、 $\text{Ca}_{2-x}\text{Na}_x\text{CuO}_2\text{Cl}_2$  単結晶をへき開した得た表面を、電界イオン顕微鏡を用いて先端形状を制御した探針を用いて測定することで行った。その結果、実際の測定条件の下で 100% に近い確率で原子分解能を繰り返し得ることができるようになった。電流揺らぎのイメージングには至らなかったものの、実現に必要である基本技術を確立することができたと考えている。

これらの技術を用いて、ホール濃度の変化によって Mott 絶縁体が超伝導化する電子状態の変化、及び、擬ギャップの発達過程を詳細に調べた。 $\text{Ca}_{2-x}\text{Na}_x\text{CuO}_2\text{Cl}_2$  を測定試料として用いることで得られる非超伝導・超伝導両方の組成を得ることができる利点を活かして、これまでに精密な分光イメージング測定が行われてこなかった超伝導発現組成をまたぐキャリア濃度領域での測定を行った。その結果、

(1) U字型の半導体的スペクトルを示す領域の中にV字型の擬ギャップ状スペクトルを示す領域が見つかること

(2) 擬ギャップ状スペクトルは超伝導試料においてみつかるそれとよく似ていること

(3) ホール濃度の増加とともに擬ギャップ状スペクトルを示す領域が増加すること

(4) 半導体的スペクトルを示す領域は Mott 絶縁相の対称性を保つのにに対し、擬ギャップ状スペクトルを示す領域は Mott 絶縁相における並進・回転対称性を局所的に破ること

を発見した。これらの結果は、擬ギャップの形成と局所的な対称性の変化の間に密接な関連が示唆する。擬ギャップと局所秩序の直接的な対応関係は本研究によって初めて明らかにされたものである。

## 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)

[学会発表] (計 8 件)

1. 幸坂祐生、超アンダードープ  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2(\text{Ca},\text{Dy})\text{Cu}_2\text{O}_y$  の低温 STM/STS 測定、日本物理学会第 62 回年次大会、2007 年 9 月 24 日、札幌
2. 幸坂祐生、不足ドープ高温超伝導体における短距離秩序の可視化、日本物理学会第 63 回年次大会、2008 年 3 月 24 日、大阪 (招待講演)
3. Y. Kohsaka, Evolution from Momentum-Space Cooper Pairing to Real-Space Pseudogap State in  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ , 21st International Symposium on Superconductivity, Oct. 28, 2008, Tsukuba, Japan (invited)
4. Y. Kohsaka, Evolution from Momentum-Space Cooper Pairing to Real-Space Pseudogap State in  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ , The 9th Korea-Japan-Taiwan Symposium on Strongly Correlated Electron Systems, Nov. 21, 2008, Tamsui, Taiwan
5. Y. Kohsaka, Evolution from momentum-space Cooper pairing to real-space pseudogap state in cuprate superconductors, Hong Kong Forum of Physics 2008 - Quantum Matters and Quantum Simulation, Dec. 13, 2008, Hong Kong, China (invited)
6. Y. Kohsaka, Evolution from momentum-space Cooper pairing to real-space pseudogap state in cuprate superconductors, APCTP 2009 Winter Workshop on Frontiers in Electronic Quantum Matter, Feb. 10, 2009, Namhae, Korea (invited)
7. Y. Kohsaka, Visualizing electronic segregation in lightly-doped  $\text{Ca}_{2-x}\text{Na}_x\text{CuO}_2\text{Cl}_2$ , 2009 American Physical Society March Meeting, Mar. 19, 2009, Pittsburgh, USA
8. 幸坂祐生、銅酸化物高温超伝導体における電子状態の発達過程～局在/実空間・遍歴/波数空間の間で～、日本物理学会第 64 回年次大会、2009 年 3 月 29 日、東京 (シンポジウム講演)

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

幸坂 祐生 (Kohsaka Yuhki)

独立行政法人理化学研究所・高木磁性研究室・基礎科学特別研究員

研究者番号：80455344