

La_{2-x}Sr_xCuO₄ の $x = 0.21$ 近傍における磁場中面内電気抵抗率とストライプ相関

In-plane electrical resistivity in magnetic fields and stripe correlations in La_{2-x}Sr_xCuO₄ around $x = 0.21$

東北大・工 足立 匡, ハイダル, 福本 勝久, 渡辺 舞, 佐藤 秀孝, 小池 洋二
東北大・金研 工藤 一貴, 西嶋 照和, 佐々木 孝彦, 小林 典男

T. Adachi¹, S. M. Haidar¹, K. Fukumoto¹, M. Watanabe¹, H. Sato¹, Y. Koike¹
K. Kudo², T. Nishizaki², T. Sasaki², N. Kobayashi²

¹ Department of Applied Physics, Graduate School of Engineering, Tohoku University

² Institute for Materials Research, Tohoku University

1. はじめに

高温超伝導体に磁場を印加すると磁束コアが形成されるが、磁束コア内の常伝導領域では、走査型トンネル顕微鏡実験からチェッカーボード様の電荷秩序が[1]、あるいは、中性子散乱実験から電荷とスピンのストライプ秩序[2]がそれぞれ形成されているとの報告がある。これらの秩序状態が超伝導と競合する隠れた秩序状態なのか否かについては明らかになっていない。

我々は、磁場によって形成されるストライプ秩序、すなわち磁場によるストライプ秩序の安定化の可能性を輸送特性の観点から調べるために、La_{2-x}Ba_xCuO₄ (LBCO) と La_{2-x}Sr_xCu_{1-y}Zn_yO₄ の $x \sim 1/8$ 付近の単結晶試料を用いて、 c 軸に平行な磁場中での CuO₂ 面内電気抵抗率 ρ_{ab} を測定してきた[3-7]。その結果、ゼロ磁場で電荷ストライプ秩序が安定化している場合には、 ρ_{ab} の超伝導転移カーブが磁場とともに低温側へ平行移動 (パラレルシフト) し、さらに、低温常伝導領域の ρ_{ab} が磁場にほとんど依らないことを見出した。一方、ゼロ磁場で電荷ストライプ秩序が不安定な場合には、 ρ_{ab} の超伝導転移カーブがアンダーブンド領域の試料に特有のブロードニングからパラレルシフト的な振る舞いに変化し、低温常伝導領域の ρ_{ab} が磁場によって増大することを見出した。これらの結果から、(i) 磁場の印加による ρ_{ab} の増大の大きさは、ゼロ磁場での電荷ストライプ秩序の安定性と密接な関連があり、さらに、(ii) La-214 系高温超伝導体において、CuO₂ 面に垂直な磁場と非磁性不純物 Zn はともに電荷ストライプ秩序を安定化させる効果を持つと結論した。

一方、La_{2-x}Sr_xCuO₄ (LSCO) の $x \sim 0.21$ において、Fig. 1 に示すような T_c のわずかな低下[8,9]、磁気相関の発達[10]、磁場による格子不安定性の増大[11]、

磁場による準粒子生成に伴う熱伝導率の増大の消失[12,13]等が観測されており、 $x \sim 1/8$ と同様にストライプ相関が発達している可能性がある」と指摘されている。ストライプ相関が発達していれば、 $x \sim 0.21$ においても ρ_{ab} の特徴的な磁場効果が観測されるかもしれない。そこで、 $x \sim 0.21$ における異常とストライプ相関との関連を明らかにするために、昨年度[14]に引き続き、LSCO の $x \sim 0.21$ において、27 T までの磁場中で ρ_{ab} を測定した。

2. 実験方法

測定に用いた LSCO ($x = 0.190, 0.206, 0.215$) の単結晶試料は、溶媒移動型浮遊帯域溶融法によって育成した。なお、Fig. 1 に示すように、 $x = 0.206$ は超伝導が特異的に抑制されている異常な組成、 $x = 0.190$ と 0.215 はその両側の正常な組成に対応する。結晶中の Sr 量は、高周波誘導結合プラズマ光学放射分光分析法 (ICP-OES) を用いて評価した。

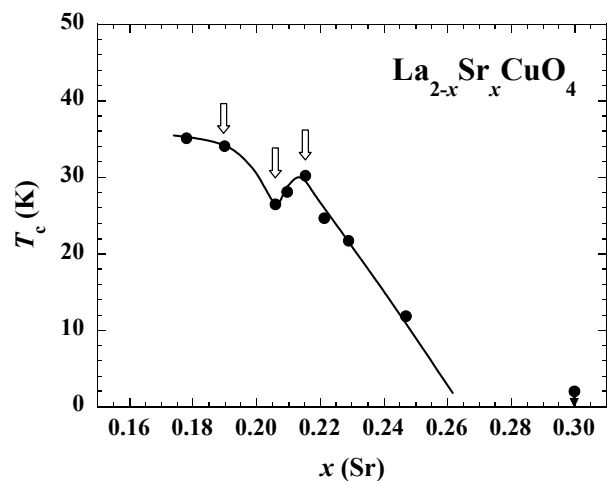


Fig. 1. Sr-concentration dependence of the superconducting transition temperature, T_c , in La_{2-x}Sr_xCuO₄. Arrows indicate the samples used for the present resistivity measurements.

磁場中での ρ_{ab} の測定は、9 T以下の磁場では物性測定システム (PPMS) を用いて、また、17.5 Tまでの磁場では東北大金研附属強磁場超伝導材料研究センターの 20 T 高均一マグネット (20T-SM) を用いて、一定磁場中で冷却しながら行った。27 Tまでの磁場中での測定は、同強磁場センターのハイブリッド・マグネット (28T-HM) を用いて、一定温度中で磁場スイープしながら行った。いずれの場合も、磁場は試料の c 軸に平行に印加した。

3. 実験結果と考察

一般に、アンダードープ領域では、 ρ_{ab} の超伝導転移カーブがブロードニングを示すが、これは、短いコヒーレンス長を持つゆらぎの大きい超伝導に起因する。一方、ホール濃度の増加とともにブロードニングは徐々に消失し、 T_c が大きく低下するオーバードープ領域では、長いコヒーレンス長を持つゆらぎの小さい超伝導に起因するパラレルシフトに変化する[15]。Fig. 2 に、LSCO の $x = 0.190, 0.206, 0.215$ における 27 T までの磁場中での ρ_{ab} の温度依存性を示す。 $x = 0.190$ では、27 T までブロードニングが観測される。一方、 $x = 0.215$ ではややパラレルシフト的になっている。しかし、 $x = 0.206$ では、 $x = 0.215$ よりもパラレルシフト的になっている。これは、 $x = 0.206$ 付近でのみゆらぎの小さい超伝導が実現していることを示唆する。

Fig. 3 に、 ρ_{ab} の超伝導転移カーブから見積もった転移幅 ΔT_c を、超伝導転移カーブの midpoint で定義した $T_c^{50\%}$ で規格化した $\Delta T_c/T_c^{50\%}$ の磁場依存性を示す。ここで、 $\Delta T_c = T_c^{80\%} - T_c^{10\%}$ と定義している。 $x = 0.190$ と 0.215 では、磁場の増加とともに $\Delta T_c/T_c^{50\%}$ は単調に増大する。これは、磁場によるブロードニングが起こっていることを示す。一方、 $x = 0.206$ では、11 T 以上で $\Delta T_c/T_c^{50\%}$ が飽和することがわかる。これは、磁場によって超伝導転移カーブがパラレルシフト的になることを示す。実際、Fig. 3 に示すように、パラレルシフト的な振る舞いが明確に観測されている LBCO の $x = 0.11$ においても、 $\Delta T_c/T_c^{50\%}$ が磁場に対して一定になっている[3-7]。

前述のように、 $x \sim 1/8$ において、ゼロ磁場で電荷ストライプ秩序が安定化している場合にはパラレルシフト的な振る舞いが観測されている。一方、パラレルシフト的な振る舞いが観測された $x = 0.206$ では、Fig. 1 で見られるように T_c が特異的に低下している。これらの結果を踏まえると、次のようなシナリオが成り立つ。すなわち、 $x \sim 0.21$ では、ゼロ磁場でスト

ライプ相関がやや発達しており、 T_c が特異的に低下し[8,9]、また、低温で磁気相関が発達している[10]。

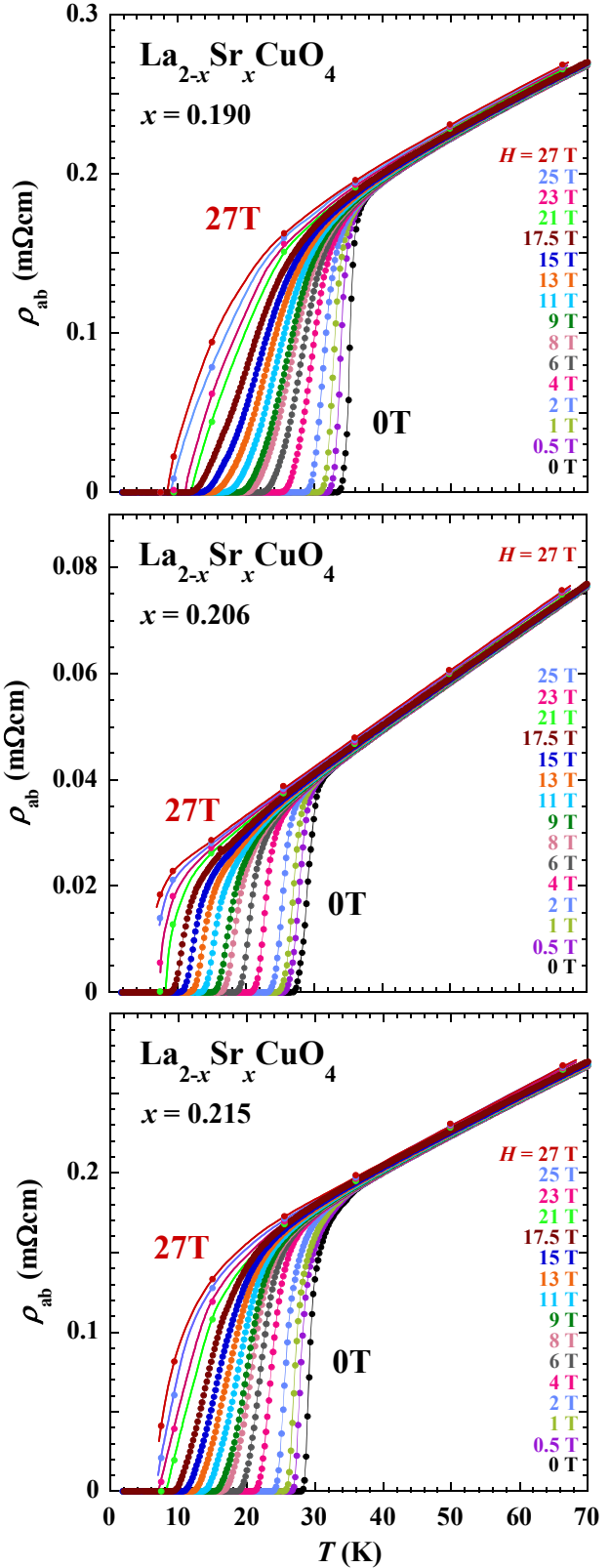


Fig. 2: Temperature dependence of the in-plane electrical resistivity, ρ_{ab} , in various magnetic fields along the c-axis up to 27 T for $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ with $x = 0.190 - 0.215$.

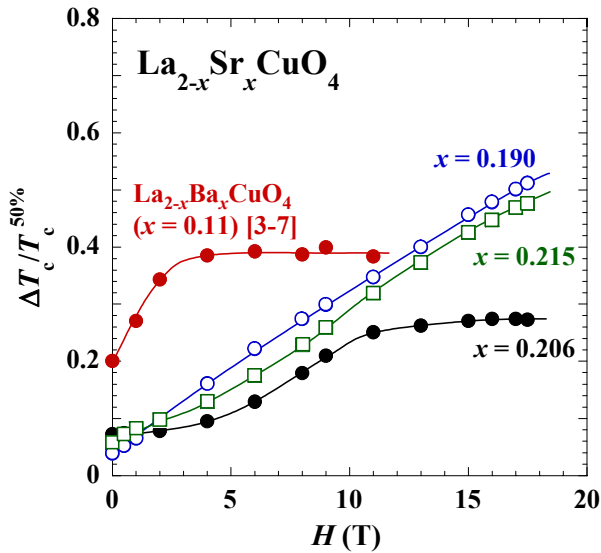


Fig. 3: Magnetic-field dependence of the superconducting transition width, $\Delta T_c (=T_c^{80\%} - T_c^{10\%})$, normalized by $T_c^{50\%}$ for $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ with $x = 0.190 - 0.215$. The data for $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$ with $x = 0.11$ are plotted for comparison [3-7],

ここで、磁場を印加すると、電荷ストライプ相関がさらに発達し、 ρ_{ab} の超伝導転移カーブが平行シフト的な振る舞いになる。以上のことから、 $x \sim 0.21$ ではストライプ相関が特異的に発達しており、また、磁場によって安定化している可能性が高いと思われる。また、電荷ストライプ秩序と平行シフト、すなわち、ゆらぎの小さい超伝導との関連については、以下のように考えられるかもしれない。すなわち、ストライプ秩序がc軸方向にある程度相関しているために、超伝導のコヒーレンス長がc軸方向にも長くなり、3次元的な超伝導が実現しているのかもしれない[3]。また、LSCOのオーバードープ領域においては、超伝導領域と常伝導領域への相分離が実現していると提案されているが[16-18]、 $x \sim 0.21$ では、ストライプ相関がやや発達した超伝導領域と、ストライプ相関のない常伝導領域への相分離が実現しているのかもしれない。

4. まとめ

LSCOの $x = 0.190, 0.206, 0.215$ の単結晶試料を用いて、磁場中で ρ_{ab} を測定した結果、 T_c が特異的に低下している $x = 0.206$ において、 ρ_{ab} の超伝導転移カーブが特異的に平行シフト的な振る舞いを示すことを見出した。このことから、 $x \sim 0.21$ において電荷とスピンのストライプ相関が発達しており、磁場によって安定化している可能性が高いと結論した。

参考文献

- [1] J. E. Hoffman, E. W. Hudson, K. M. Lang, V. Madhavan, H. Eisaki, S. Uchida and J. C. Davis: *Science* **295**, 466 (2002).
- [2] B. Lake, H. M. Rønnow, N. B. Christensen, G. Aeppli, K. Lefmann, D. F. McMorrow, P. Vorderwisch, P. Smeibidl, N. Mangkorntong, T. Sasagawa, M. Nohara, H. Takagi and T. E. Mason: *Nature (London)* **415**, 299 (2002).
- [3] T. Adachi, N. Kitajima, T. Manabe, Y. Koike, K. Kudo, T. Sasaki and N. Kobayashi: *Phys. Rev. B* **71**, 104516 (2005).
- [4] 足立匡、川股隆行、眞鍋武、小池洋二、工藤一貴、佐々木孝彦、小林典男：東北大学金属材料研究所強磁場超伝導材料研究センター、平成16年度年次報告 pp. 3 - 6 (2005).
- [5] 足立匡、大森圭祐、川股隆行、小池洋二、工藤一貴、佐々木孝彦、小林典男：東北大学金属材料研究所強磁場超伝導材料研究センター、平成17年度年次報告 pp. 3 - 6 (2006).
- [6] T. Adachi, T. Kawamata, Y. Koike, K. Kudo, T. Sasaki and N. Kobayashi: *AIP Conf. Proc.* **850**, 429 (2006).
- [7] T. Adachi, K. Omori, T. Kawamata, K. Kudo, T. Sasaki, N. Kobayashi and Y. Koike: *J. Phys.: Conf. Series* **51**, 259 (2006).
- [8] N. Kakinuma, Y. Ono and Y. Koike: *Phys. Rev. B* **59**, 1491 (1999).
- [9] T. Kawamata, T. Adachi, T. Noji and Y. Koike: *Phys. Rev. B* **62**, R11981 (2000).
- [10] I. Watanabe, M. Aoyama, M. Akoshima, T. Kawamata, T. Adachi, Y. Koike, S. Ohira, W. Higemoto and K. Nagamine: *Phys. Rev. B* **62**, R11985 (2000).
- [11] T. Suzuki, T. Ota, J. Tonishi and T. Goto: *AIP Conf. Proc.* **850**, 409 (2006).
- [12] 足立匡、ハイダル、菅原直樹、金子直人、上坂正憲、佐藤秀孝、田邊洋一、野地尚、小池洋二、川股隆行、工藤一貴、小林典男：東北大学金属材料研究所強磁場超伝導材料研究センター、平成19年度年次報告 pp. 8 - 11 (2008).
- [13] T. Adachi, S. M. Haidar, T. Kawamata, N. Sugawara, N. Kaneko, M. Uesaka, H. Sato, Y. Tanabe, T. Noji, K. Kudo, N. Kobayashi and Y. Koike: *J. Phys.: Conf. Series* **150**, 052115 (2009).

- [14] 足立匡、ハイダル、佐藤秀孝、小池洋二、工藤一貴、佐々木孝彦、小林典男：東北大学金属材料研究所強磁場超伝導材料研究センター、平成 19 年度年次報告 pp. 5 – 7 (2008).
- [15] M. Suzuki and M. Hikita: Jpn. J. Appl. Phys. **28**, L1368 (1989).
- [16] Y. Tanabe, T. Adachi, T. Noji and Y. Koike: J. Phys. Soc. Jpn. **74**, 2893 (2005).
- [17] Y. Wang, J. Yan, L. Shan, H.-H. Wen, Y. Tanabe, T. Adachi and Y. Koike: Phys. Rev. B **76**, 064512 (2007).
- [18] Y. Tanabe, T. Adachi, K. Omori, H. Sato, T. Noji and Y. Koike: J. Phys. Soc. Jpn. **76**, 113706 (2007).