

論文の内容の要旨

論文題目：銅酸化物超伝導体 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ のドーピング制御と輸送特性に関する研究

氏名：仙場浩一

高温超伝導は、ドーピングされた Mott-Hubbard 絶縁体で見られる物理現象である。近年、この絶縁体と高温超伝導体の境界領域への注目が高まっている。量子ゆらぎによって反強磁性と超伝導の秩序形成が共に抑制されたこの領域には、0 K での相転移点いわゆる量子臨界点が存在する可能性が指摘されている。いまだに実験のメスがないこの希薄ドーピング域にこそ、高温超伝導を理解する鍵が潜んでいる可能性がある。

我々は、温度可変平衡酸素圧下アニールを精密化することにより、アンダードーピング $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_6$ 試料を安定的に得ることに成功した。そして、この手法を用いることによって、量子臨界点組成を含む低ドーピング領域の系統的な輸送特性の測定に初めて成功した。実験の結果明らかとなった特筆すべき特徴は、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ の常伝導状態での抵抗率、ホール係数等輸送特性の温度依存性が $x \approx 0.5$ を境に急峻に変化する事である (図1, 図2)。高ドーピング域 ($x > 0.5$) では、温度依存性が顕著であるのに対して、低ドーピング側 ($x < 0.5$) では温度依存性が特に低温で抑制される。ホール数 ($n_H = \frac{1}{eR_H}$) は近似的に $n_H \propto x - 0.2$ ($0.2 < x < 0.5$) に従う。これらは、何らかのクロスオーバを観測している可能性がある。

また、薄膜を用いた輸送特性の有限サイズスケーリング解析によって、臨界点組成近傍 60 K 程度の温度から、面抵抗が変数 $\frac{|x-x_c|}{T^{1/z\nu}}$ ($x_c = 0.4 \pm 0.02$, $z\nu = 1.2 \pm 0.2$) に対してスケールすることを見出した (図 3) [2]。単位胞中の一組の CuO_2 面を実効的な一層の二次元的伝導層と仮定して計算した一層あたりの臨界面抵抗は、二次元ボゾンモデルによるユニバーサルな値 ($\frac{h}{4e^2}$) とほぼ一致する。超伝導絶縁体転移における面抵抗のスケーリングが観測されたことは、絶対零度に存在すると考えられる超伝導絶縁体転移量子臨界点の存在を示唆し、その臨界領域が 60 K に達することを示す。低ドーピング領域でのバルク結晶に関するホール測定結果 (図 2) より、スケーリング変数の分子は、本質的にキャリア密度と考えられるため、本実験は、超伝導絶縁体転移における面抵抗スケーリングの様子をキャリア密度を制御変数として初めて測定した実験であると言える。

通常の相転移である超伝導転移の臨界領域ではなく、超伝導絶縁体転移量子臨界点の大きな臨界領域の存在をキャリア密度を制御変数として初めて明らかにした点を強調しておきたい [2]。この知見は、銅酸化物で発現する高温超伝導が大きな量子臨界領域に接して、

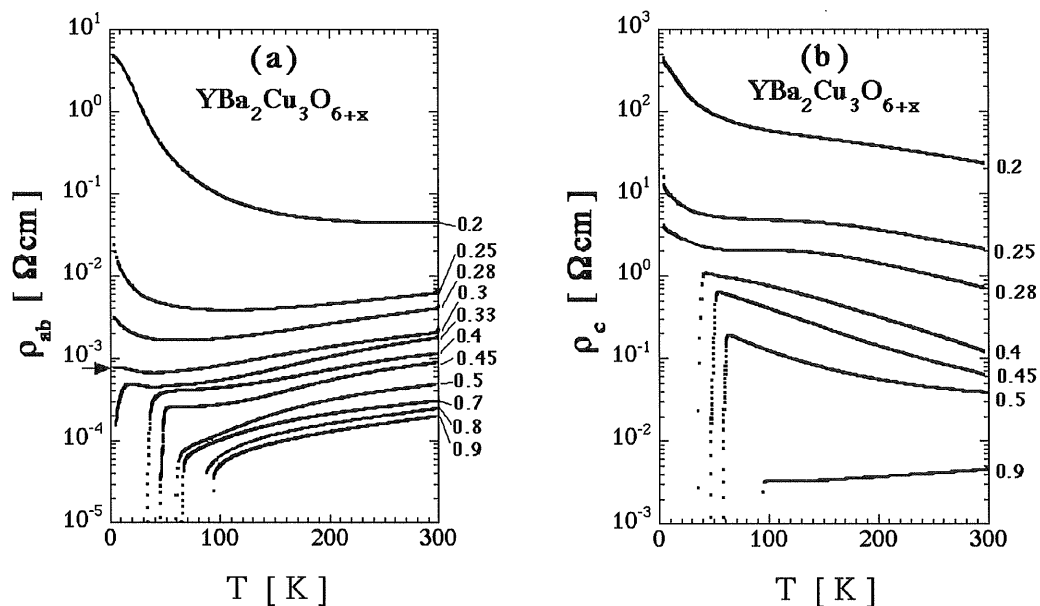


図 1 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ の (a) 面内抵抗率 ρ_{ab} 、(b) 面間抵抗率 ρ_c のドーピング依存性。SI-転移の臨界面抵抗率は $0.8 \text{ m}\Omega\text{cm}$ 付近である。クーバー対の臨界面抵抗 $\frac{h}{4e^2} \simeq 6.45 \text{ k}\Omega$ を矢印で示す。面内抵抗率 ρ_{ab} の温度依存性は、酸素組成 $x \simeq 0.5$ を境に明瞭に変化する。 $x \simeq 0.5$ を境とする輸送特性の明瞭な変化は、ホール測定でも観測されており [1]、超伝導ゆらぎの古典-量子クロスオーバを観測している可能性も考えられる。

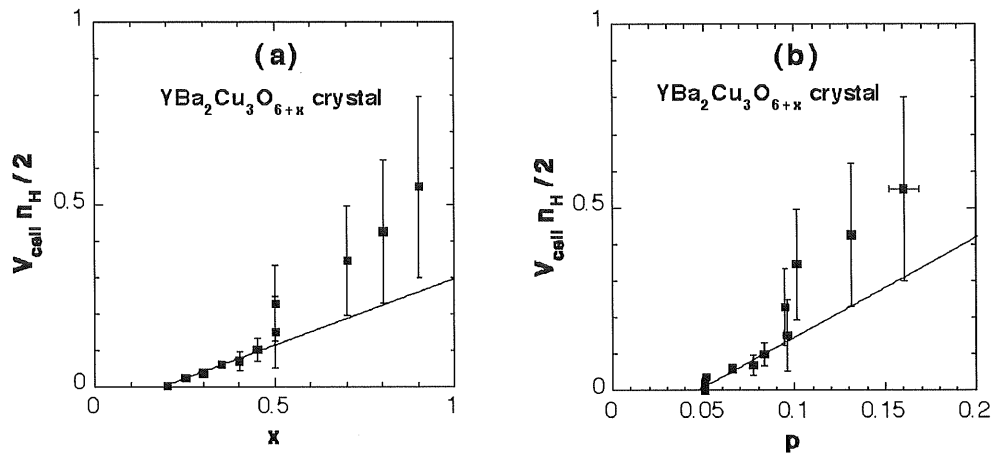


図2 (a) ホールナンバーの酸素組成（ドーピング）依存性。 $T_c < T < 300$ Kでの温度による変化を各組成におけるエラーバーで表す。低ドーピング域 $0.2 < x < 0.5$ での線形関係に注意 [1]。(b) ホールナンバーを面内 Cu サイトあたりの有効ホール密度 p に対してプロットしたもの。有効ホール密度は各試料の T_c より $\frac{T_c}{T_{c,max}} = 1 - 82.6(p - 0.16)^2$ 式によって求めた。こちらでも、低ドーピング域 $0.05 < p < 0.1$ での線形関係が見られることに注意。

あるいは囲まれて存在することを示唆する（図4）。

論文では、上記研究に加え、(1) 本研究の対象物質である $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ のいわゆる 1:2:3 組成の発見の経緯および結晶構造の同定に関する研究 [3]、(2) 超伝導臨界温度 T_c より高温側での超伝導ゆらぎに起因する磁気抵抗測定あるいは、磁場中における抵抗転移データより超伝導コヒーレンス長 (ξ) を導出する研究 [4],[5]、そして、(3) 銅酸化物超伝導体における 起源の異なる二種類の超伝導ゆらぎである Aslamazov-Larkin ゆらぎと Maki-Thompson ゆらぎ の比較の研究 [5] についても述べる。

参考文献

- [1] K. Semba and A. Matsuda, Phys. Rev. Lett. **86**, 496 (2001).
- [2] K. Semba, A. Matsuda, and M. Mukaida, Physica B**281&282**, 904 (2000).
- [3] K.Semba, S.Tsurumi, M.Hikita, T.Iwata, J.Noda, S.Kurihara, Jpn. J. Appl. Phys. **26**, L429 (1987).
- [4] K. Semba, A. Matsuda and T. Ishii, Phys. Rev. B**49**, 10043 (1994).
- [5] K. Semba, T. Ishii, and A. Matsuda, Phys. Rev. Lett. **67**, 769 (1991); **67**, 2114(E) (1991).

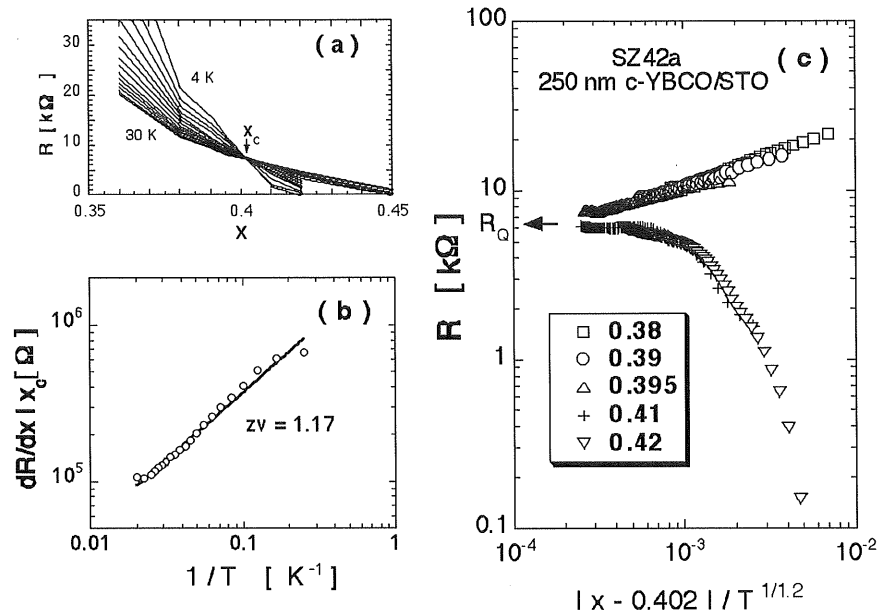


図3 薄膜試料に関する有限サイズスケーリング解析。(a) ドーピング x の関数で現した試料の面抵抗。抵抗率より、 $R = \rho_{ab}/d$ (d は c -軸長) によって面抵抗を求めた。4 K から 30 K の温度範囲のデータを示す。(b) T^{-1} の関数としての $|dR/dx|(x_c)$ の log-log プロット。4 K から 50 K の温度範囲のデータを示す。スケーリングが成立していれば、傾きは $1/z\nu$ に等しい。最小二乗法から得られた傾きは $z\nu = 1.17$ 。(c) 面抵抗値のスケーリングの様子。変数 $|x - 0.402|/T^{1/1.2}$ について大凡 65 K の温度までのデータがスケーリングに従う。

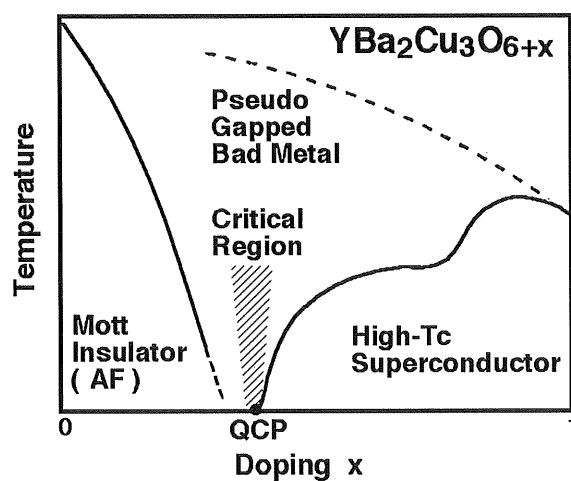


図4 本研究から提案される $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ SI-転移量子臨界点 (QCP) 付近の相図。面抵抗スケーリングが観測される温度より、QCP の臨界領域が約 60 K に達すると考えられる。