

## 高温超伝導体の強磁場／極低温における常伝導輸送現象

安藤陽一

(財) 電力中央研究所

〒201-8511 東京都 狛江市 岩戸北 2-11-1

## [イントロダクション]

高温超伝導が起こるメカニズムは、1986年に最初の高温超伝導体が発見されて以来10年を経た現在もまだ解明されていない。この間に、RVB理論、SCR理論、バイポーラロン理論など、さまざまなメカニズム理論の提案が行われてきたが、実験的情報の不足のために、正しい理論を選別することはまだできていない。しかしここ数年の間に、

- ・ 超伝導転移温度以上でフェルミ面に開く擬ギャップの発見
- ・  $T_c$ 以下における準粒子散乱時間が異常に長くなることの発見
- ・ 超伝導電子状態の対称性がd波であることの発見
- ・ 低温における常伝導電子の特異な局在効果の発見

などの実験的発見が相次ぎ、これらの新発見の現象の原因を突き止めることによって高温超伝導メカニズムの解明に近づくことができると期待されるようになってきた。また、これら新しい発見に刺激されてSO(5)理論などの新しいメカニズム理論の提案も行われている。

高温超伝導のメカニズムに迫るための実験的戦略の一つとして、超伝導が起こる舞台となる常伝導の電子系の状態を詳しく調べる、ということが考えられる。特に、絶対零度における常伝導電子状態の姿がわかれば、高温超伝導のモデルハミルトニアン の作り方に直接の示唆を与えることが出来る。このためには超伝導状態を壊して低温での常伝導電子の性質を調べることが重要である。高温超伝導体以前の超伝導の研究においては、磁場をかけて超伝導を壊して常伝導状態を測定することは普通の実験手段であった。しかし、高温超伝導体においては、超伝導状態を壊すのに必要な磁場が非常に高いため、このような実験はこれまでほとんど行われてきていなかった。

特に高温超伝導体は電気的な異方性が強く(図1)、常伝導状態における抵抗率を測ると、金属的な温度依存性と半導体的な温度依存性が一つの物質中で共存するという、非常に変わった振る舞い(図2)を示すことが知られているが[1]、この変わった振る舞いが超伝導転移温度( $T_c$ )以下でどうなるかという問題は、これまで $T_c$ 以下の常伝導抵抗率の温度依存性を十分低温まで測ることができなかったため謎として残されていた。

## [我々の研究]

我々はまず $T_c$ が40 K以下のランタン系高温超伝導体(LSCO)単結晶を用い、61 Tまでのパルス強磁場を印加し、常伝導化した状態での抵抗の温度依存性を0.7 Kの低温から100 K以上の温度まで測定した。この結果、単結晶中の銅酸素面に平行な方向の抵抗率が、超伝導転移温度より高温側の

講義ノート

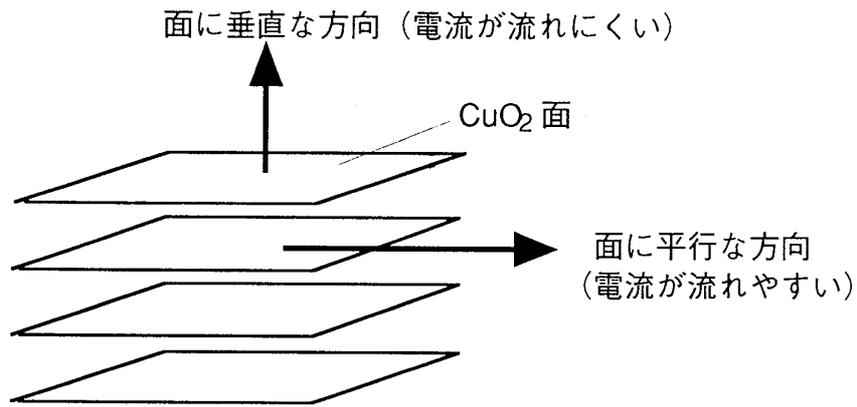


図1 高温超伝導体の構造と電気的な異方性の概念図

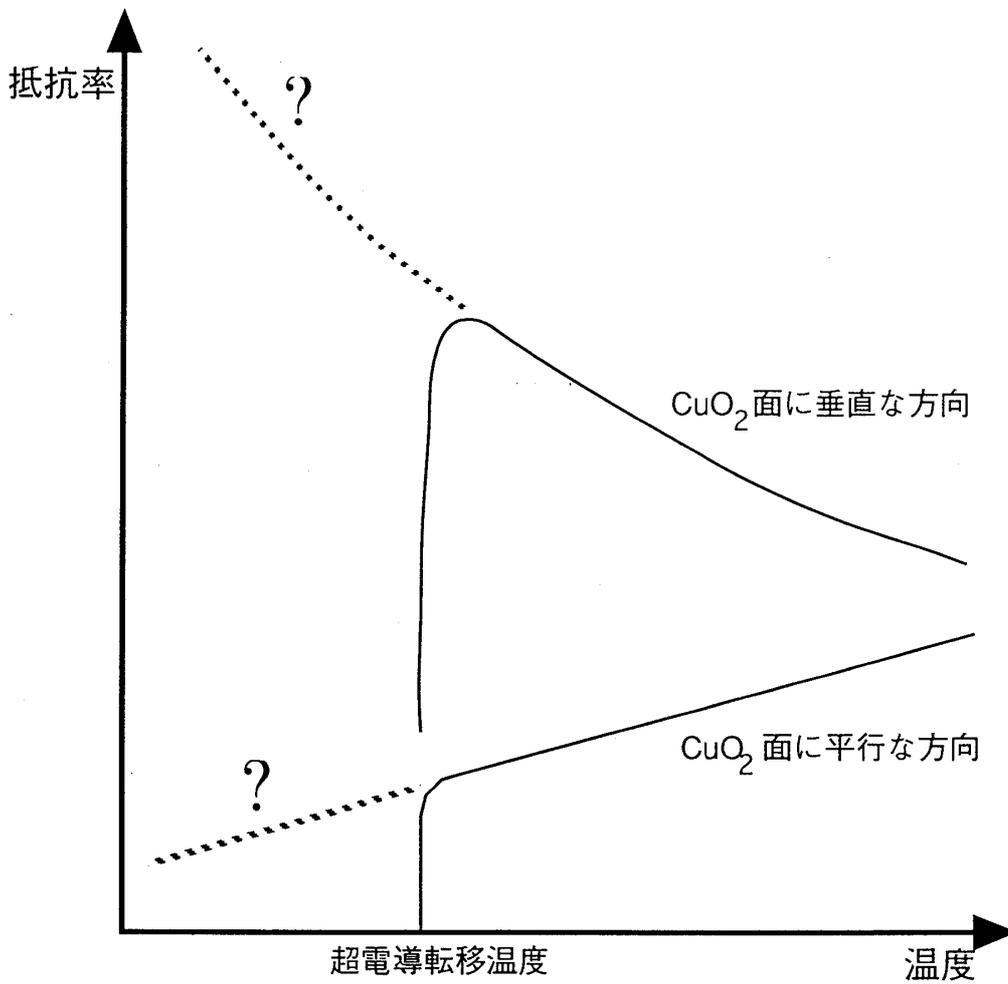


図2 高温超伝導体における異方的な電気抵抗率の温度依存性。金属的な温度依存性と半導体的な温度依存性が一つの物質中で共存している。

振る舞いから期待される金属的な温度依存性を示すのではなく、低温で絶対温度の対数に反比例して発散する  $\log(1/T)$  という、全く予期しない振る舞い (図3) を示すことがわかった [2]。それと同時に、面と垂直な方向の抵抗率の温度依存性も、低温では通常言われる「半導体的」である  $\exp(\Delta/T)$  よりもずっと遅い  $\log(1/T)$  の依存性を示し、面内方向と同じ温度依存性になることもわかった [2]。

さらに不足ドーピング領域から過剰ドーピング領域まで広い範囲でキャリア濃度を変えた多くの試料で測定を行ったところ、LSCOの最低温極限における常伝導抵抗率は、ちょうど最適ドーピングを境にして金属 (過剰ドーピング側) - 絶縁体 (不足ドーピング側) 転移を起こし、しかもこの金属 - 絶縁体転移は面内方向と  $c$  軸方向において同時に起こっていることがわかった [3]。つまり、不足ドーピング側では絶縁体的な常伝導相の基底状態として超伝導相が実現していることになる。またこの金属 - 絶縁体転移は、転移点における抵抗率から計算される  $k_F l$  の値が約10と、十分金属的な領域にあるにもかかわらず絶縁体的な振る舞いを示し始めるという点で異常である ( $k_F$  はフェルミ波数、 $l$  は電子の平均自由行程)。

つぎに我々は、ランタン系高温超伝導体よりも異方性の強いビスマス系高温超伝導体 (Bi-2201) 単結晶を用い、少しずつ不純物の含有量を変えた試料を同様の方法で測定した。この結果、不純物が少なくなるに従って低温での銅酸素面に平行な方向の抵抗率の発散が弱くなることがわかった [4]。さらに非常に不純物が少ない試料においては、超伝導転移温度以上で見られる、銅酸素面に平行な方向と垂直な方向の抵抗率の対照的な振る舞いが、0.66 Kの極低温まで存続し得る (図4) ことが確認された [4]。これにより、ランタン系で発見された抵抗率の対数発散は、高温

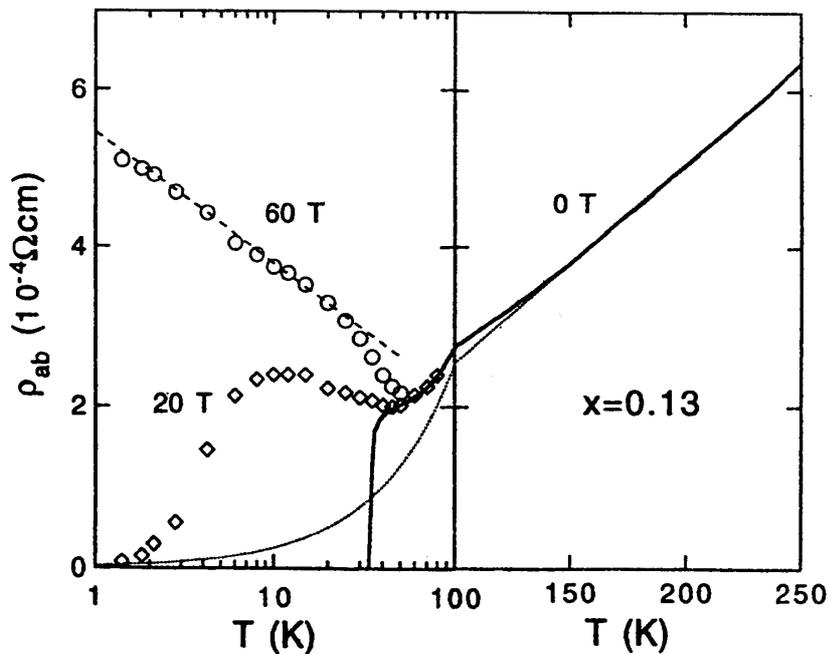


図3 わずかに不足ドーピング領域にあるランタン系高温超伝導体の面内抵抗率の温度依存性。低温における抵抗率の対数発散を示すため、左側は温度の対数でプロットしてある。

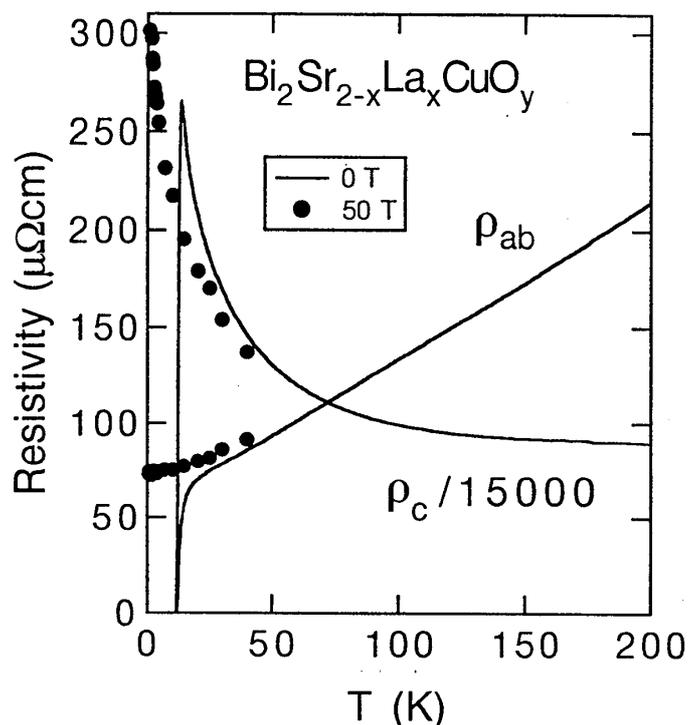


図4 不純物が非常に少ないビスマス系高温超伝導体の面内抵抗率および面間抵抗率の温度依存性。銅酸素面に平行な方向と垂直な方向の抵抗率の対照的な振る舞いが、0.66 Kの極低温まで存続している。

超伝導体に特有の2次元電子状態における特殊な準粒子局在効果によるものである可能性が濃厚になった。最近、ランタン系高温超伝導体においては、charge stripe と呼ばれる銅酸素面上の一種の電荷密度波がダイナミカルに起こっていることを示唆するデータが報告されており [5]、ランタン系は高温超伝導体ファミリーの中でも特にこの charge stripe の不安定性が強いと考えられている。我々のLSCOの測定で発見された  $\log(1/T)$  の抵抗発散は、この charge stripe 不安定性と関係がある可能性もある。

さらに最近の実験では、上記のLSCOとBi-2201において、強磁場で超伝導を壊したときの低温での常伝導ホール係数の温度依存性の測定を行っている [6]。その結果、ランタン系のように異常な局在効果が起こっている場合もビスマス系のように最低温まで面内抵抗率が金属的に残る場合も、共に低温での常伝導ホール係数は温度依存性を示さずにほぼ一定の値になることがわかった。このことは、低温での輸送現象が soft Coulomb gap のようなフェルミ面近傍での電子状態密度の変化によって支配されているのではなく、むしろ不純物ポテンシャルによる散乱のようなメカニズムによって支配されていることを示唆する。

これまでに高温超伝導発現の理論としてさまざまなアイデアが提案されているが、実験的な情報が不足しているために、正しい理論の方向性はまだ見いだされていない。我々の実験結果、特にビ

スマス系高温超伝導体における結果は、フェルミ流体論的モデルでは理解しがたいものであり、電子状態が非フェルミ流体的であることを直接示唆するものである。また、ランタン系の結果は、高温超伝導体の異常金属相において、これまでに知られているアンダーソン局在等とは異なったメカニズムによる準粒子の局在効果が起こり得ることを示しており、電子状態のモデルに強い制限を加えるものである。これら一連の実験によって明らかにされた極低温での常伝導状態に関する情報は、高温超伝導の理論的解明に大きな手がかりを与えるものと期待している。

ここで紹介したパルス強磁場の実験は、筆者がアメリカのベル研究所に客員研究員として滞在していた期間中に、同研究所のパルス強磁場設備を用いて行われた。この研究は、G. S. Boebinger、A. Passner（ベル研）、木村剛、奥谷昌之、下山淳一、岸尾光二（東大応用化学）、玉作賢治、市川能也、内田慎一（東大超伝導工学）、N. L. Wang、C. Geibel、F. Steglich（Darmstadt工科大）の各氏との共同研究である。

#### [参考文献]

- [1] P.W. Anderson, *Science* 256, 1526 (1992).
- [2] Yoichi Ando, G.S. Boebinger, A. Passner, Tsuyoshi Kimura, and Kohji Kishio, *Phys. Rev. Lett.* 75, 4662 (1995).
- [3] G.S. Boebinger, Yoichi Ando, A. Passner, T. Kimura, M. Okuya, J. Shimoyama, K. Kishio, K. Tamasaku, N. Ichikawa, and S. Uchida, *Phys. Rev. Lett.* 77, 5417 (1996).
- [4] Yoichi Ando, G.S. Boebinger, A. Passner, N.L. Wang, C. Geibel, and F. Steglich, *Phys. Rev. Lett.* 77, 2065 (1996).
- [5] J.M. Tranquada, *Physica C* 282-287 (M2S-HTSC V, Pt. 1), 166 (1997).
- [6] Yoichi Ando, G.S. Boebinger, A. Passner, N.L. Wang, C. Geibel, F. Steglich, I.E. Trofimov, and F.F. Balakirev, *Phys. Rev. B* 56, 8530R (1997).