

Bi2201 における格子非整合磁気相関とホール濃度の関係について

Relationship between incommensurate magnetic correlation and hole concentration in Bi2201

東北大・金研 榎木 勝徳, 藤田 全基, 西嶋 照和, 工藤 一貴, 小林 典男
M. Enoki, M. Fujita, T. Nishizaki, K. Kudo, N. Kobayashi
Institute for Materials Research, Tohoku University

1. 背景

銅酸化物高温超伝導体の研究において、中性子散乱で観測される磁気励起の物理的起源を明らかにする目的で、複数の理論モデルが提唱され活発な議論が続けられている。しかし、未だ共通の理解には至らず、重要な課題として残存している。この原因として、これまでの中性子散乱実験による磁気励起の研究が、主に $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ (LSCO) や $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+d}$ (YBCO) の2つの組成系で成されており、それ以外での系の実験が乏しく、提唱される理論モデルを見分けるデータが十分に得られていないことが挙げられる。この現状を踏まえ、我々は新たな系として $\text{Bi}_{2-x}\text{Sr}_{2-x}\text{CuO}_{6+d}$ (Bi2201) 銅酸化物の単結晶育成、中性子散乱実験を進めている。これまで、組成の異なる複数の試料において中性散乱実験を行った結果、格子非整合型の磁気励起シグナルが観測され、Biの置換量減少、すなわちホール濃度の増加に伴った磁気ピークの格子非整合度の増加を示す結果が得られている。本研究では、中性子散乱実験に用いた試料のホール濃度の絶対値を見積もり、磁気相関とホール濃度の関係を明かにしたい。不足ドーピングのLSCOでは、ホール濃度 p と磁気励起スペクトルの非整合度 δ との間に $p \sim \delta$ の強い関係が成り立っており、この関係から、 CuO_2 面上のホールが一次元的に整列するストライプ相関といった特異な電子相関の存在が議論されている。Bi2201においても、この関係が成立する可能性があり、この系の磁気相関を他の系との比較、議論する上で、ホール濃度の決定が重要な鍵を握っている。

2. 実験方法

安藤らによって銅酸化物高温超伝導体では CuO_2 面上のCuあたりのホール濃度と、規格化されたホール係数 $R_{\text{H}}eV/N$ とが一对一の対応を示す経験則がなりたっていることが報告されている[1]。ここで $R_{\text{H}}[m^3/C]$ はホール係数の実測値、 $e[C]$ は電荷素量、 $V[m^3]$ は単位胞の体積、 N は単位胞あたりのCu原子の個数である。Bi2201系でも工藤らによって同様の手順でホール濃度の評価を行っている[2]。図1は安藤らの結果から、縦軸に200Kにおける $R_{\text{H}}eV/N$ 、横軸ホール濃度 p でプロットしたものである。指数関数曲線でフィッティングした結果、 $R_{\text{H}}eV/N=43.56\exp(-p/0.0484)$ といった校正曲線が得られた。ホール係数測定は、試料の温度を安定させるために200 Kで測定を行った。200 Kでの校正曲

線を用いて測定試料のホール濃度を同定する。試料はワイヤーソーを用いて、 $x=1.5\text{ mm}$ 、 $y=1.0\text{ mm}$ の大きさに成形した。また超音波洗浄機を用いて試料を劈開させることで、 $d=10\sim 50\ \mu\text{m}$ の程度の厚みにした。それぞれの試料の厚みはマイクロメーターを用いて決定した。電流 I は $0.01\sim 0.1\text{ mA}$ を流し、 c 軸方向に最大 $H=18\text{ T}$ の磁場を印加し試料に発生する起電力 $E(V)$ を計測した。

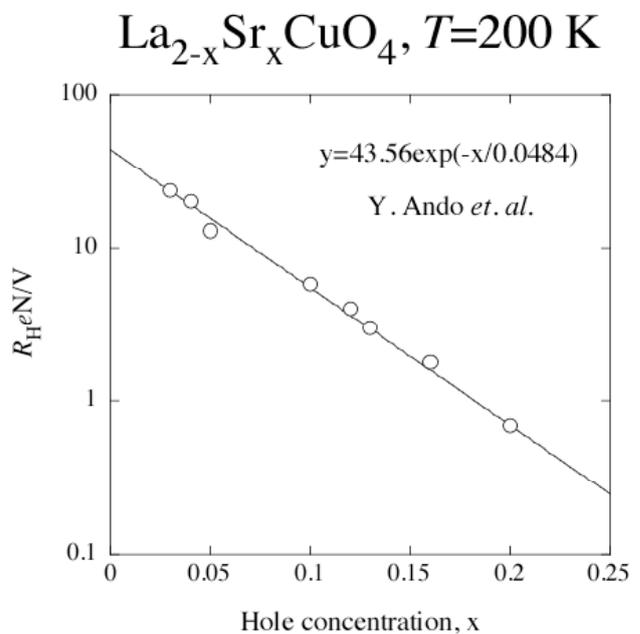


図1: 安藤等によって測定されたLSCOのホール濃度(x)とホール係数(y)の関係。得られた校正曲線 $y=43.56\exp(-x/0.0484)$ を用い、ホール係数からホール濃度を見積もった。

3-1 結果 (ホール濃度の決定)

図2にホール起電力の大きさを流した定常電流の大きさを割ったもの(V/I)を印加磁場 H に対してプロットした。図2のとおり、 $H=0\text{ T}$ においても有限の起電力が発生している。これは接合した電圧端子が正確に対称な位置についておらず、 x 方向にズレがあるために、定電流を流すことで生じている x 方向の起電力を計測していることに起因している。端子の付き具合に多少の良し悪しがあるものの、 $\pm 18\text{ T}$ といった広い磁場領域での V/I を測定する事で、 H に対する傾きを精度よく見積もる事ができた。また

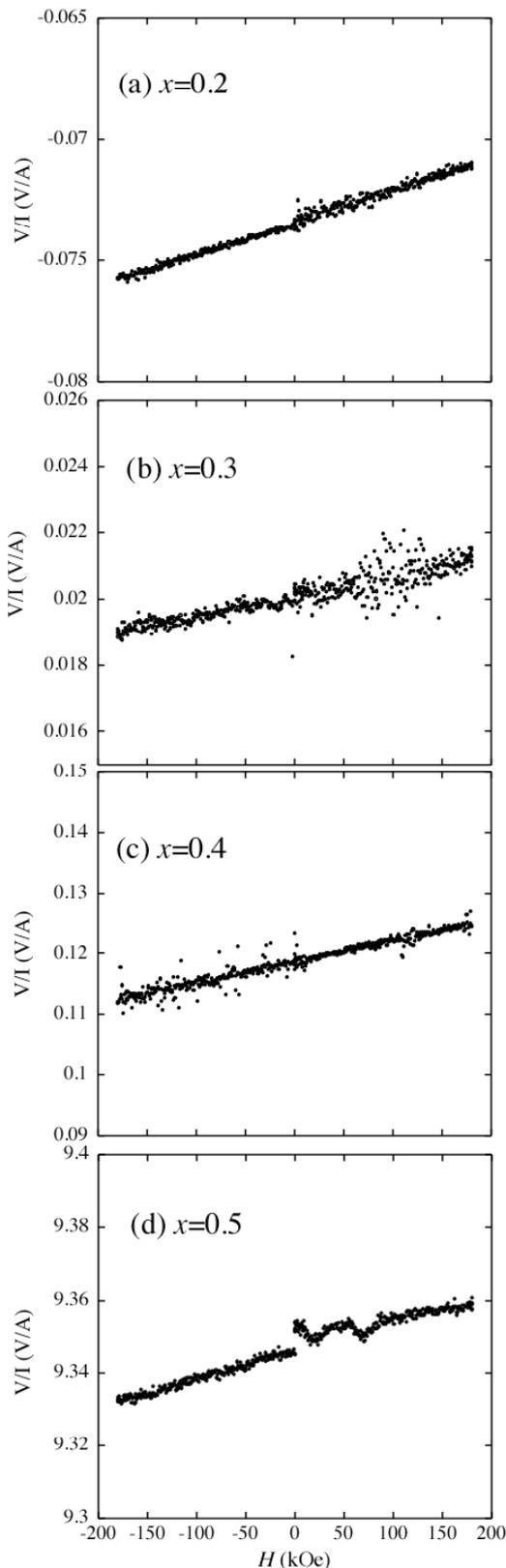
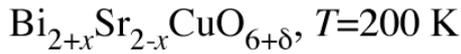


図2 : 測定したホール起電力と印加磁場の関係。印加磁場に対し線形にホール起電力が増加しており、この傾きから、ホール係数を導出した。

この傾きから R_H を見積もることで、電圧端子のズレによる起電力の影響をなくすることができる。図3は図2の縦軸に $H=0\text{T}$ における V/I の値を差し引いて、試料の厚み d をかけて規格化したものである。 x の値が大きくなるにつれて、傾きが大きくなっていくことが伺え、Bi 置換が単調にホール濃度を減らしている事を明示している。

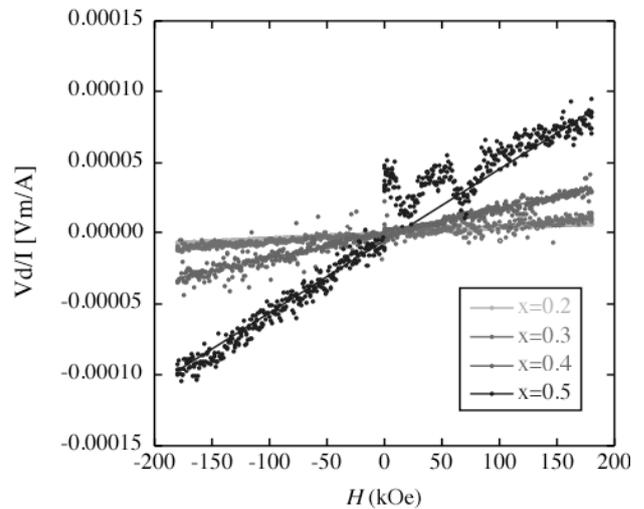
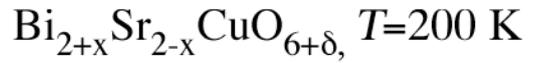


図3 : 試料の厚みで規格化したホール起電力の印加磁場依存性。Bi 置換量の増加に伴い傾きが大きくなって行く様子が伺え、Bi 置換量の増加に対してホール濃度が系統的に減少している。

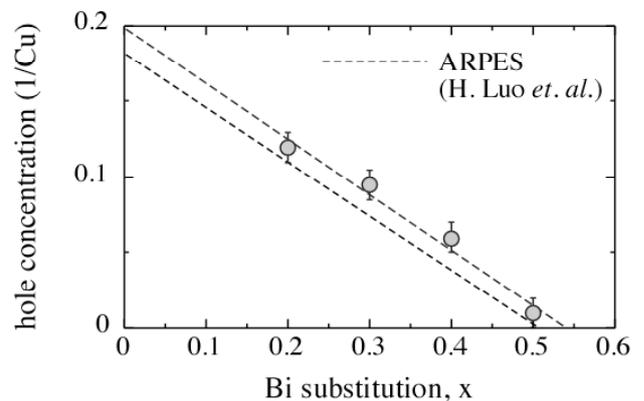
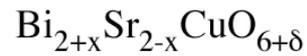


図4 : Bi 置換量に対しホール濃度をプロットしたもの。Bi 置換量とホール濃度がほぼ線形に対応していることが伺える。

続いて、測定した傾きからそれぞれの試料における $R_{\text{He}}V/N$ を用いて、 p を校正曲線から見積もった。試料の厚みの測定精度が 2 桁程度、また傾きのフィッティング誤差から、それぞれの試料のホール濃度に対しておおよそ ± 0.01 の誤差がある。得られ

たホール濃度を Bi 置換量 x に対してプロットしたものが図 4 である。また図中に示した破線は Luo らによる ARPES のフェルミ面から見積もったホール濃度である[3]。ホール係数測定から得られた結果のほうがやや高い値となっているが傾きは似たような結果となっている。 $x=0.2\sim 0.5$ の間では、Bi 置換は単調にホール濃度を減らす効果があることが伺える。

3-2 結果 (ホール濃度と格子非整合度の関係)

見積もったホール濃度に対して、中性子非弾性散乱実験によって決定した磁気励起の格子非整合度の大きさを図 5 にプロットした。図から明らかのように、Bi2201 の格子非整合度のホール濃度依存性は、 $\delta \sim p$ の直線に乗っている。この結果は、同じ単層系の LSCO と共通のホール濃度依存性となっている。一方、二枚層の YBCO では、 $\delta \sim p$ の直線には乗らなず、異なるホール濃度依存性が報告されており、 $\delta \sim p$ の関係は一枚層系のみで共通するホール濃度依存性であると考えられる。このことは、二枚層内の面間の相互作用の有無が磁気励起のホール濃度依存性を決定付ける上で重要な役割を果たしている可能性が示唆される。

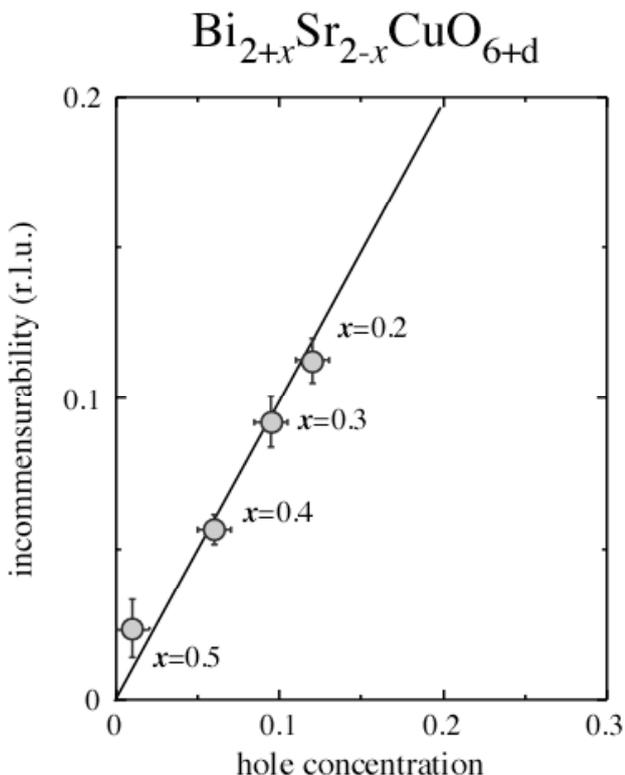


図 5 : Bi 置換量に対しホール濃度をプロットしたもの。Bi 置換量とホール濃度がほぼ線形に対応していることが伺え、LSCO と同様のホール濃度依存性となっている。

4. まとめ

18T の磁場を印加することによって、Bi2201 のホール係数を精度よく見積もることができた。本研究の目論み通り、Bi の置換量の増加に伴い、ホール濃度が系統的に減少することを確認する事ができた。したがって、Bi2201 は磁気励起などの諸物性のホール濃度依存性を系統的に調べる事が可能な系であるといえる。

更に、見積もったホール濃度に対して、格子非整合度は $\delta \sim p$ の関係を満たしていることが明らかとなった。この結果は同じ一枚層の LSCO では共通するが、二枚層の YBCO では異なっており、層数の相違が磁気励起のホール濃度依存性の相違に繋がる可能性が明らかとなり、銅酸化物高温超伝導体の磁気励起のホール濃度依存性を整理する上で重要な情報が得られた。

参考文献

- [1] Y. Ando, Phys. Rev. B, **61**, R14956, (2000)., Ando, Phys. Rev. B **63** 069902(E) (2001).
- [2] K. Kudo *et al.* J. Phys. Soc. Jpn., **78**, 084722, (2009).
- [3] H. Luo *et al.* Supercond. Sci. and Tech., **12**, 125024 (2008)