

第4章 考察

D.C.Johnstonのフィッティングによって得られるパウリ常磁性 $\chi^{\text{Pauli}} (= \mu_B^2 D(\epsilon_F))$ は、フェルミ面での (ホール) 状態密度 $D(\epsilon_F)$ を反映している。すなわち χ^{Pauli} は、 CuO_2 面のホール密度 (とホールの有効質量) を反映した物理量である。ところでBiの価数を+3として電気中性条件からキャリア密度を見積もり、これを元に実験データを整理してみたがデータのばらつきが大きく有効な議論が難しい (付録)。そこで実験データを主にパウリ常磁性 χ^{Pauli} を元に整理して議論を進めたいと思う。

酸素量 y とこのパウリ常磁性の関係を示したのが図4-1である。酸素量 y が増加するにつれて、パウリ常磁性すなわちCuの価数も増加する。しかし酸素量が多くなるにつれて飽和してくるように見える。これはキャリア (ホール) 数が多いときは、キャリア数が変化してもフェルミ面での状態密度があまり変化しないと言う電子構造を示唆しているのかもしれない。

$\text{Ca量}x=1.0$ のときはオーバードープ領域で T_c が下がり始めるあたりで T_c と T_{max} は一致するが、Ca-rich のときにはオーバードープ域で T_c が下がり始めても T_c と T_{max} は一致していないことが確認できる (図4-2)。

しかし、全ての組成 ($x=1.0\sim 1.6$) の T_c と T_{max} を χ^{Pauli} で整理し同じスケールで比較すると、 T_{max} が一本の曲線にのる事が新たに分かった (図4-3)。 T_{max} はある $\chi^{\text{Pauli}} (\sim 1.35 \times 10^{-4} (\text{emu/Oe} \cdot \text{mol}))$ を境にして傾きの異なる2つの直線からなっている様にも見える。また $\chi^{\text{Pauli}} \sim 2 \times 10^{-4} (\text{emu/Oe} \cdot \text{mol})$ 付近でCa量1.0~1.6の全ての T_c と T_{max} が一致するように見える。図4-2でCa-richのときに T_c と T_{max} は一致しないように見えるのは、Ca-richほど χ^{Pauli} の値が小さい試料できやすい為に十分に χ^{Pauli} の値が大きい試料ができにくかったからであると考えられる。

スピンのゆらぎ χ_{max}^{2D} も χ^{Pauli} で整理した (図4-4)。すべてのデータ ($x=1.0\sim 1.6$) が一つの曲線にのることが新たに分かった。 χ_{max}^{2D} は χ^{Pauli} が増加すると共に直線的に減少し、ある $\chi^{\text{Pauli}} (\sim 1.35 \times 10^{-4} (\text{emu/Oe} \cdot \text{mol}))$ で一定となる。これは酸素量の変化に伴って注入されたホールがCuスピンを消滅させていくことを示唆していると考えられる。

また χ_{max}^{2D} が一定となるとき χ^{Pauli} と、 T_{max} のゆるやかな減少が急激な減少に変化し始めるときの χ^{Pauli} の値が、ほぼ一致している ($\chi^{\text{Pauli}} \sim 1.35 \times 10^{-4} (\text{emu/Oe} \cdot \text{mol})$) のには非常に注目できる。 T_{max} が減少するのはCuスピン間の (Oを介在した) 超交換相互作用 J が減少することを意味していると考えられる。すなわちCuスピンの消滅が抑制されると J の減少の傾きが変化するのが同時に起こっていることになる。

この現象を次の様に解釈した。ホール濃度が小さい場合 ($\chi^{\text{Pauli}} < 1.35 \times 10^{-4} (\text{emu/Oe} \cdot \text{mol})$)、 CuO_2 面に注入されたホールは酸素サイトに入りZhang-Rice一重項を形成し、Cuスピンを消滅させていく (図4-6)。ホール濃度が大きい場合 ($\chi^{\text{Pauli}} > 1.35 \times 10^{-4} (\text{emu/Oe} \cdot \text{mol})$)、Zhang-Rice一重項が隣り合うサイトに生じることが多くなるはずである。このときZhang-Rice一重項が解消されOスピンドうしが一重項を形成すると考えると、ホールが注入されたにも関わらずCuスピンが増えることになる。実際にはホールは CuO_2 面内を動き回るはずなので、Zhang-Rice一重項が隣り合ったり離れたたりしてZhang-Rice一重項の解消と形成を繰り返し、全体としてはCuスピンの消滅が抑えられる様に見えると考えられることができる。また隣り合うサイトにZhang-Rice一重項ができた場合、そのCuスピン間の J は非常に小さくなるはずである。

同じ χ^{Pauli} で T_{max} の値もほぼ同じあるにも関わらずCa-richになるにつれて、 T_c が下がる理由としては(図4-5)、d-wave超伝導体の対破壊に有効な CuO_2 面におけるランダムなポテンシャルによる散乱が考えられる。d-wave超伝導体では、磁気不純物でなくても不純物があると対破壊を引き起こすということが報告されている^{2),3)}。今回の系の場合、Ca-richになるとSrサイトに過剰に含まれたBiやCaが入ると考えられる。したがって CuO_2 面の隣にあるSrO面の乱雑さが、ランダムなポテンシャルを CuO_2 面に生じさせ対破壊を生じさせている可能性がある⁴⁾。Ca-richになると共に CuO_2 面によりランダムなポテンシャルを発生させ、 T_c を減少させたと考えることができる。

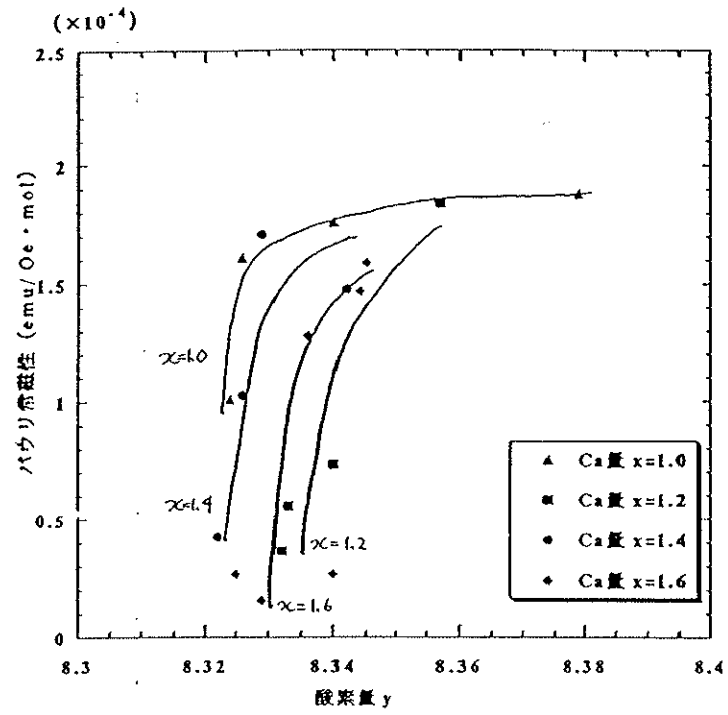


図4-1. $\text{Bi}_{2.18}\text{Sr}_{3-x}\text{Ca}_x\text{Cu}_2\text{O}_y$ の酸素量とパウリ常磁性の関係

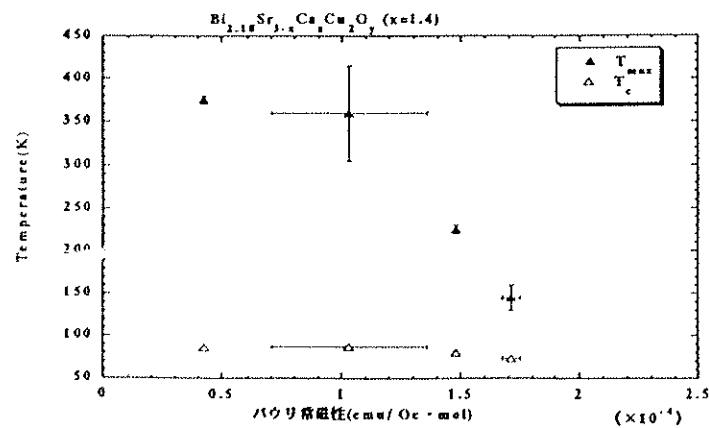
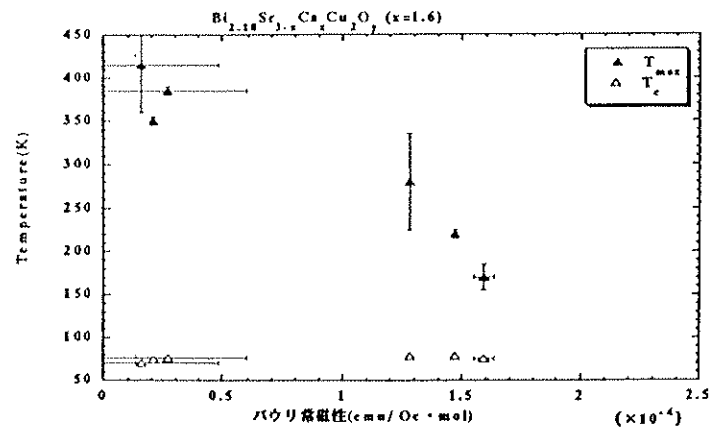
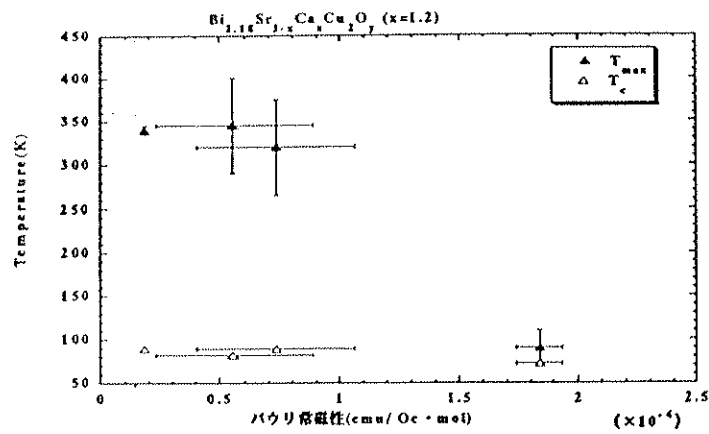
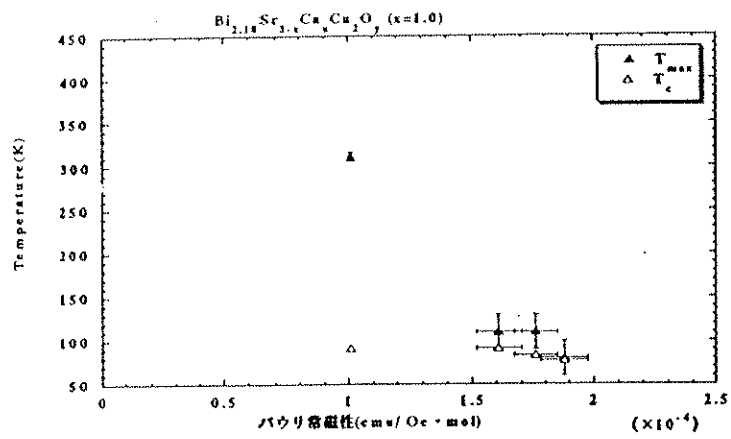


図4-2. T_{c} と T_{max} の変化 (上から $x=1.0$, 1.2 , 1.4 , 1.6)

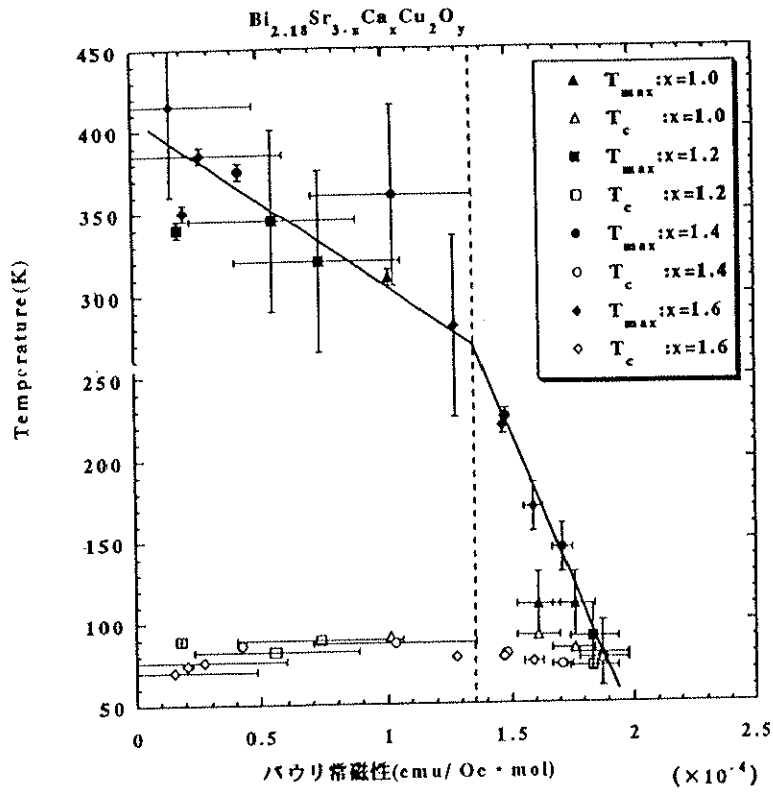


図4-3. T_c と T_{\max} の変化をまとめたもの

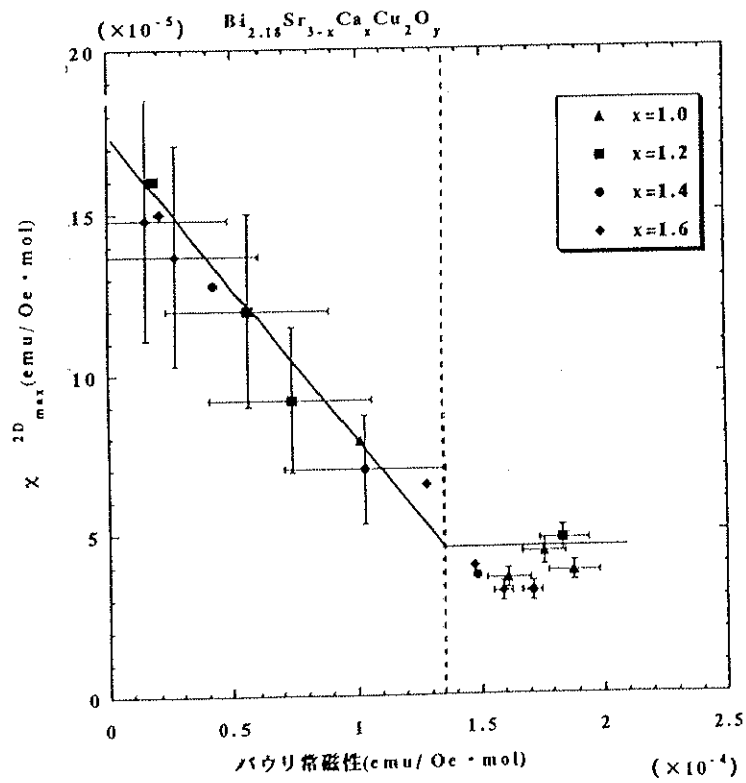


図4-4. χ^{2D}_{\max} の変化

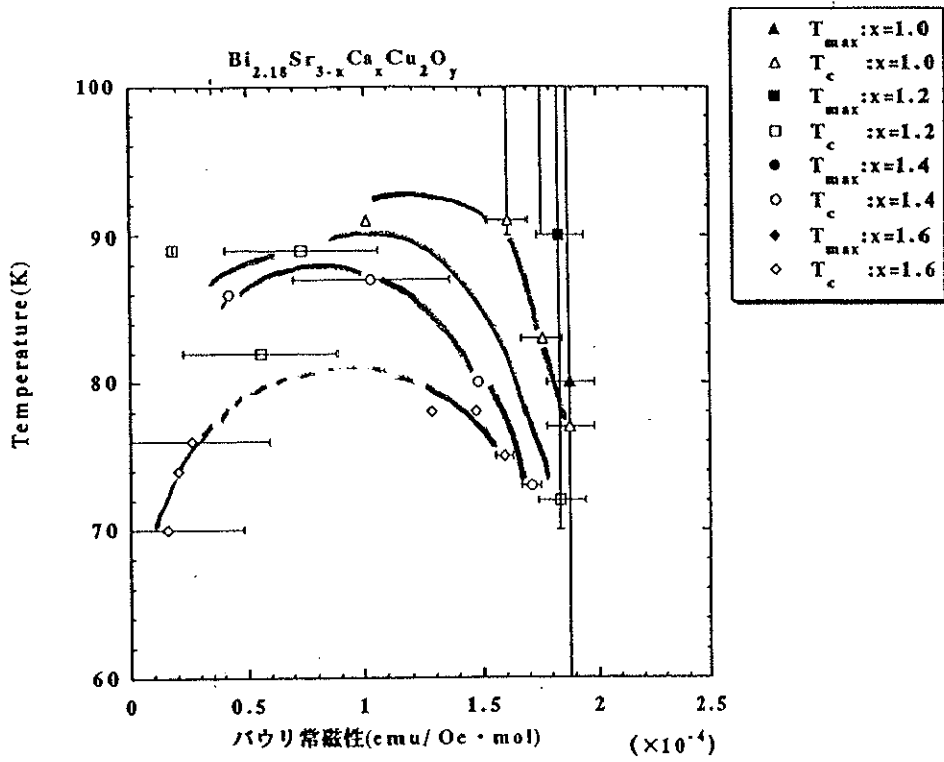


図4-5. T_{c} と T_{max} の変化の T_{c} 部分の拡大図

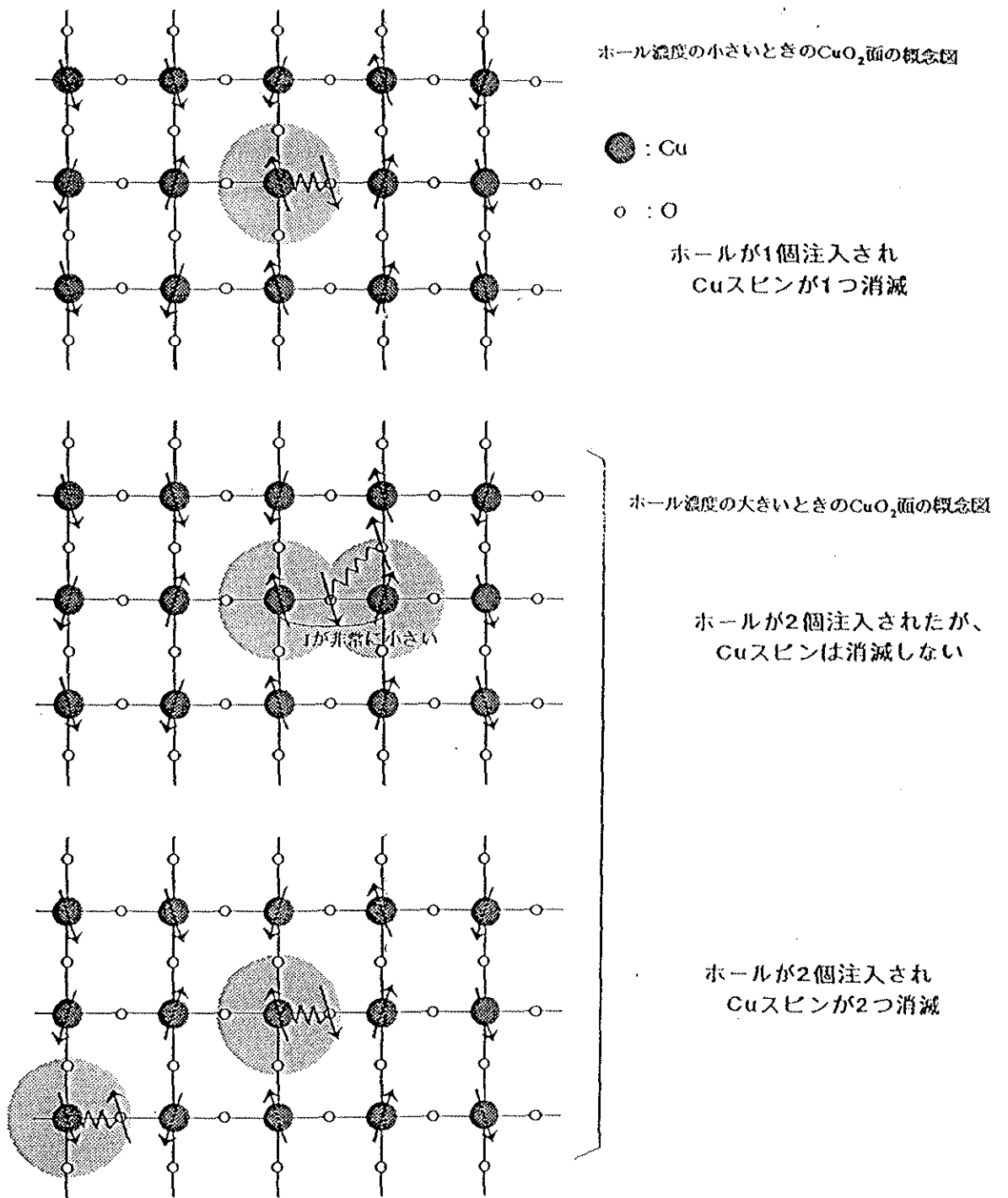


図4-6. ホールが注入されたときの CuO_2 面の概念図

参考文献

1. Y.Idemoto and K.Fueki, *Physica C*168, 167(1990).
2. R.J.Radtke, K.Levin, H.B.Schuttler, and M.R.Norman, *Phys.Rev.B* 48,653(1993).
3. L.S.Borkowski and P.J.Hirschfeld, *Phys.Rev.B* 49,15404(1994).
4. J.Arai, Y.Iwata, and K.Umezawa, *Phys.Rev.B* 54,12557(1996).