

Granular Bi における3次元アンダーソン局在

東北大金研 小池洋二, 岡村正己, 深瀬哲郎

3次元系における弱局在領域の実験的研究は、これまで、不純物半導体やGranular Al等で盛んに行われてきたが、最近、半金属であるBiにおいても、弱局在効果と思われる現象が見出されたので報告する¹⁾

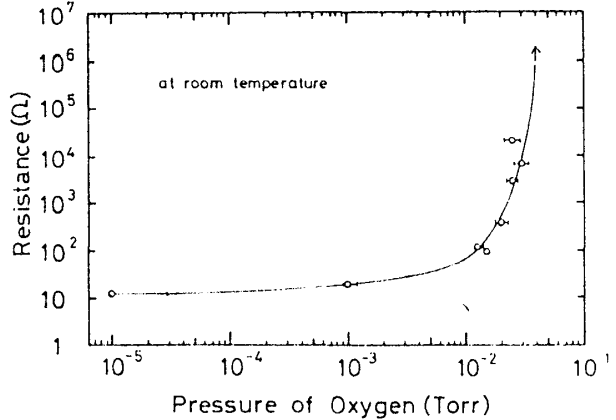
試料

試料はBi(99.9999%)の室温での酸素中蒸着で作製した。この手法はGranular Alを作製する場合に用いられたものと同じで、得られた試料は、多かれ少なかれ、酸化膜に覆われたBi粒子の集合体とみなせる。蒸着時の酸素量により、Fig. 1に示すように、種々の抵抗値をもった試料を得ることができる。また、試料の膜厚は、1160 Å—13400 Åと厚く、測定温度範囲では、系はほぼ3次元と考えられる。(注: 膜厚のかなり薄い2次元的なBi薄膜については、Komori et al.²⁾の報告がある。)

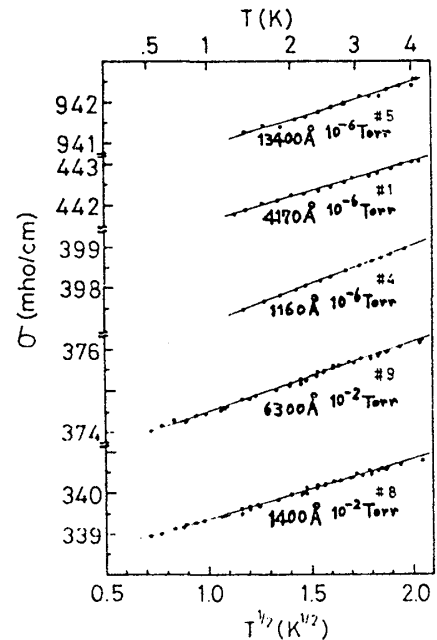
実験結果

各種試料の低温での電気伝導度の温度依存性をFig. 2に示す。いずれの試料においても、温度の低下につれて、 σ に比例した電気伝導度の減少がみられる。これは、乱れた3次元系におけるクーロン相互作用の効果か、あるいは、非弾性散乱の緩和時間 τ が T^{-1} に比例すると仮定した場合の局在効果と考えられる。

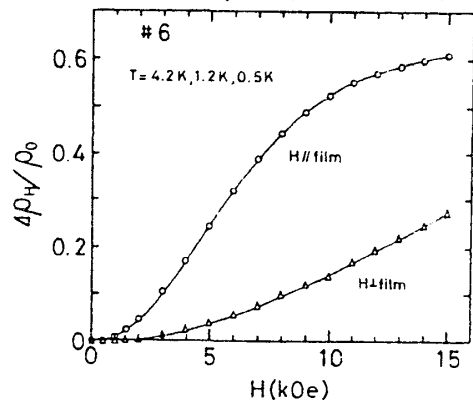
次に横磁気抵抗の結果を示す。高真空(1×10^{-6} Torr)中蒸着で得た試料では、Fig. 3のように、4.2 K以下ではほとんど温度変化のないノーマルな磁気抵抗を示す。H//filmでは、サイズ効果の影響が現われて、H $\perp$ filmの場合よりも磁気抵抗は大きい。一方、 1×10^{-2} Torrの酸素中蒸着で得た試料の横磁気抵抗は、Fig. 4のようになる。磁気抵抗の大きさは、高真空中蒸着の試料に比べてかなり小さく、系の乱れの大きいことを示唆している。高磁場側では、 H^2 に比例したノーマルな磁気抵抗が観測されるが、低磁場側に異常な磁気抵抗が現われてくる。この異常な磁気抵抗は、ノーマルな磁気抵抗の小さいFig. 2において、より明確に見ることができ、78 Kでは認められず、低温で現われ、温度の低下とともに増大する正の磁気抵抗



[Fig. 1] 室温での電気抵抗の酸素量による変化。(膜厚はいずれも約5000 Å)



[Fig. 2] 電気伝導度の温度変化。数字は蒸着時の真空度と膜厚とを示す。

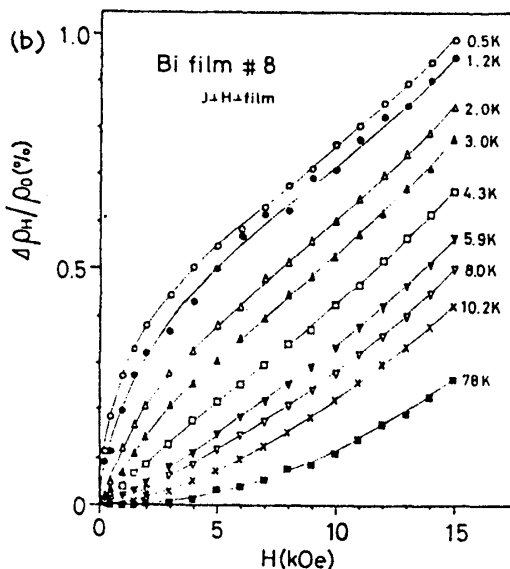
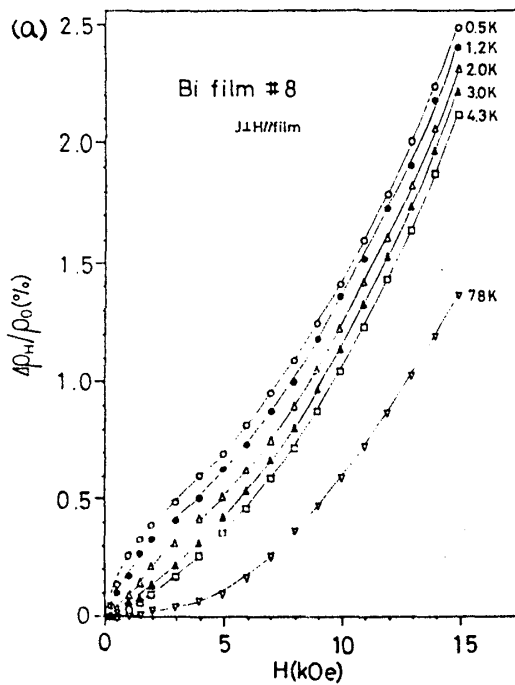


[Fig. 3] 高真空中蒸着で得た試料の横磁気抵抗 (1×10^{-6} Torr)

である。高磁場側のノーマルな磁気抵抗は、低温では温度変化しないので、その部分を差引いて、異常部分を磁気伝導率の形で抜き出すと、才5図のようになる。この異常な磁気抵抗は、磁場とともに増大するが、乱れた3次元系でよく見られるような冪的な変化ではない。また、異常な磁気抵抗の大きさは、(a)図でも(b)図でもほとんど変わらず、異常は3次元的であるといえる。

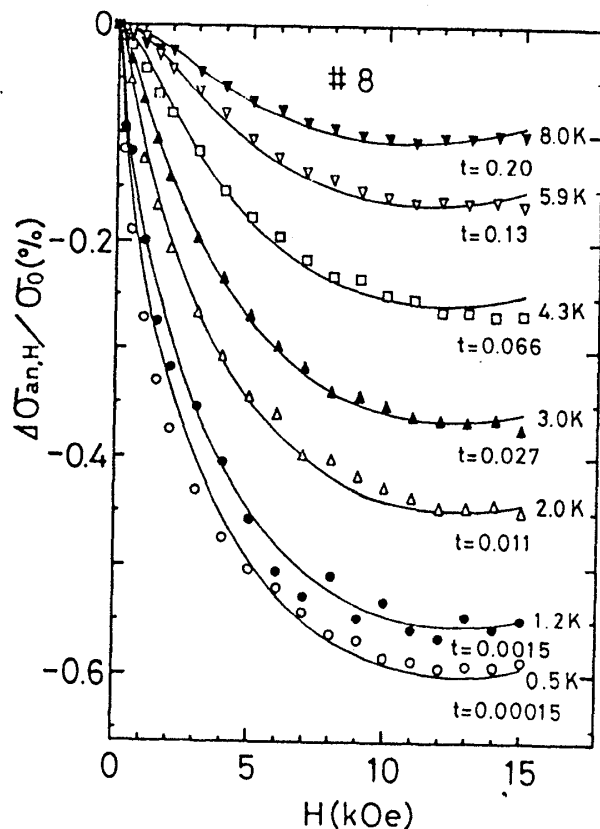
考察

(i) 異常な正の磁気抵抗について-----3次元系の弱局在領域においては、局在効果から冪に比例した負の磁気抵抗³⁾、電子間のクーロン相互作用の効果から冪に比例した正の磁気抵抗^{4,5)}が現われることが理論的に示されている。一方、Granular Biにおける異常な正の磁気

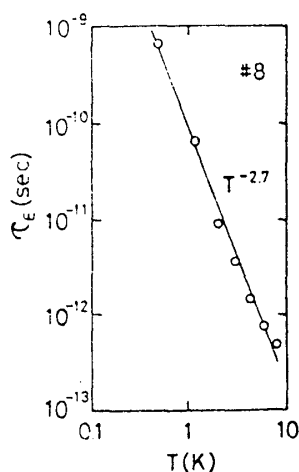


[才4図] 1×10^{-2} Torr の酸素中蒸着で得た試料の横磁気抵抗 (a) $H \parallel \text{film}$ (b) $H \perp \text{film}$

抵抗の振舞いは、冪的ではない。また、仮にクーロン相互作用に起因しているとするならば、高温側または低磁場側で局在効果による負の磁気抵抗が現われるのが普通である。したがって、これらの効果だけで説明できるほど単純ではない。しかし、Fukuyama and Hoshino⁶⁾のスピントラップ相互作用及びゼーマン効果を考慮した局在効果の理論を用いれば、かなりよく説明できることが分かった。それによれば、磁気伝導率は、次のように表わされる。



[才5図] 才4図(b)の横磁気抵抗の異常部分(磁気伝導率として抜き出す)。実線は(1)式による計算曲線と示す。



【オ6図】オ5図に示したパラメータを $\times 10^{-14}$ sec と見積り、 $\varepsilon_F \tau / \hbar = 2.3$, $\lambda = 1.0 \times 10^{-6}$ cm, $K = 0.12$, $\tau_{so} = 4.0 \times 10^{13}$ sec から求めた非弾性散乱の緩和時間の温度変化。

$$\frac{\Delta \sigma_H}{\sigma_0} = \frac{\sqrt{h} F\left(\frac{1+t}{h}\right) + 0.5 \sqrt{\frac{h}{1-t}} \left\{ F\left(\frac{t}{h}\right) - F\left(\frac{t}{h}\right) \right\} - \frac{\sqrt{t} - \sqrt{t_+}}{\sqrt{1-t}} + \sqrt{t} - \sqrt{t_+}}{\frac{8}{3\sqrt{3}} \left(\frac{\varepsilon_F \tau}{\hbar} \right)^2 \sqrt{\frac{\tau_{so}}{t}} + 3\sqrt{1+t} - \sqrt{t}} \quad \dots (1)$$

ここで、 $h = (\lambda/l)^2 (\tau_{so}/3\tau)$, $l = (c\hbar/eH)^{1/2}$, $t = \tau_{so}/4\tau$, $t_{\pm} = t + 0.5(1 \pm \sqrt{1-t})$, $\gamma = (Kh)^2$, $K = \frac{3}{8} \left(\frac{m^*}{m} \right) g^* / (\varepsilon_F \tau / \hbar)$, $F(s) = \sum_{N=0}^{\infty} \left\{ 2(\sqrt{N+1+s} - \sqrt{N+s}) - \frac{1}{\sqrt{N+1/2+s}} \right\}$ で、 ε_F , λ , m^* , g^* はそれぞれ、フェルミエネルギー、平均自由行程、有効質量、有効 g -値である。また、 τ , τ_E , τ_{so} は、それぞれ、弾性散乱、非弾性散乱、スピン軌道散乱の緩和時間である。(1)式は、定性的には、局在効果を抑制するスピン軌道散乱が磁場によって抑えられるために、温度の低下とともに大きな正の磁気抵抗が現われると理解でき、実験結果と定性的に一致する。実際、実験から $\tau = 1.0$

とすると、オ5図に実験で示したように、 τ とパラメータとして、かなりよく実験結果を再現できる。また、B1ではスピン軌道相互作用が大きいのと思われることを考え合わせると、異常な正の磁気抵抗は、スピン軌道相互作用が強い場合の局在効果として理解できそうである。オ5図に示したパラメータ τ から求めた τ_E の温度依存性は、オ6図に示すように T^{-3} に近く、非弾性散乱には主として電子-フォノン散乱が効いていると推測できる。また、オ3図に示した高真空中蒸着膜で異常が認められなかったのは、ノーマルな磁気抵抗が大きくて、それにマスクされたためと思われる。

iii) 零磁場での電気伝導度の T 依存性について……スピン軌道相互作用を考慮した局在効果の理論によれば、電気伝導度の補正項は、次のように表わされる。

$$\sigma'_{so}(T) = \frac{e^2}{2\pi^2 \hbar} \cdot \frac{1}{D \tau_{so}} (3\sqrt{1+t} - \sqrt{t}) \quad \text{ただし } D \text{ は拡散定数} \quad \dots (2)$$

(2)式では、 $t = 1/8$ で温度係数の符号が逆転し、 $t < 1/8$ では温度の低下とともに電気伝導度がわずかに増大する。一応、オ5図に用いたパラメータ τ の値は、4.2K 以下では $t < 1/8$ となっており、同じ τ の値を用いて、温度の低下とともに減少する電気伝導度を説明することはできない。しかしながら、電子間のクーロン相互作用の効果によって、ある程度説明できる。クーロン相互作用による電気伝導度の補正項は、次のように表わされる。

$$\sigma'_i(T) = \frac{e^2}{2\pi^2 \hbar} \cdot 0.915 \left(\frac{2}{3} - \frac{3}{2} F \right) \sqrt{\frac{k_B T}{D}} \quad \text{ただし } F \text{ は電子のスクリーニングを表わすパラメータ} \quad \dots (3)$$

B1では $F \sim 0.03$ であり、実験結果との定性的な一致はよい。また、実験から見積った D の値を代入すると、 σ'_i/σ の値を求めることができるが、その値は実験値の約 $1/5$ である。しかし、(3)式が単純な丸いフェルミ面における計算であることを考慮すると、定量的にもそれほど悪い不一致とは言えないだろう。したがって、零磁場の電気伝導度の T 依存性は、電子間のクーロン相互作用の効果として理解できそうである。また、このクーロン相互作用の効果が磁気抵抗に現われるのは、理論的に磁気抵抗の比例係数として現われる F の値が、B1では小さすぎるためと思われる。

——文献—— 1) Y. Koike, M. Okamura and T. Fukase: J. Phys. Soc. Jpn. 52(1983)No.4. 2) F. Komori, S. Kobayashi and W. Sasaki: J. Phys. Soc. Jpn. 52(1983)368. 3) A. Kamabata: Sol. St. Commun. 34(1980)431. 4) P.A. Lee and T.V. Ramakrishnan: Phys. Rev. B26(1982)4009. 5) Y. Isawa, K. Hoshino and H. Fukuyama: J. Phys. Soc. Jpn. 51(1982)3262. 6) H. Fukuyama and K. Hoshino: J. Phys. Soc. Jpn. 50(1981)2131.