

スピン密度波状態での量子ホール効果

姫路工業大学理学部 長谷川泰正

有機導体 $(\text{TMTSF})_2\text{X}$, ($\text{X} = \text{PF}_6, \text{ClO}_4$ など) は温度, 圧力, 磁場などを変化させたときに金属・絶縁体・超伝導など多様な相を示し理論的にも興味深い物質である. 絶縁体相は電子間の斥力とフェルミ面のネスティングによるスピン密度波 (SDW) 状態と考えられている. 圧力により SDW の出現は抑制されるが, そこにさらに磁場をかけると再びスピン密度波が出現する. この磁場誘起スピン密度波 (Field Induced Spin Density Wave, FISDW) では, 半導体でと同様な量子ホール効果が観測されている.

この系は, TMTSF 分子が 1 次元的に積み重なった構造をしていてその方向に大きな伝導性を示す. 電子状態を表すモデルとしては, トランスファーの大きさの比が $t_a : t_b : t_c = 1 : 0.1 : 0.003$ の異方的なハバードモデル

$$H = -t_a \sum_{\langle ij \rangle_a \sigma} c_{i,\sigma}^\dagger c_{j,\sigma} - t_b \sum_{\langle ij \rangle_b \sigma} c_{i,\sigma}^\dagger c_{j,\sigma} - t_c \sum_{\langle ij \rangle_c \sigma} c_{i,\sigma}^\dagger c_{j,\sigma} + U \sum_i n_{i\uparrow} n_{i\downarrow}$$

でよく記述できると考えられている. FISDW を考えるときには, c 軸方向のトランスファー t_c は無視できて, 異方性の強い 2 次元電子系とみなせる. 量子ホール効果は, 半導体で実現される 2 次元電子系においてよく研究がなされているが, そこで量子ホール効果が見られる場合には最低ランダウレベルのみが占有されるような状況になっている. $(\text{TMTSF})_2\text{X}$ の系では 2 次元面内の電子密度が半導体の場合と比べると 3 桁程度も大きいので, 同様の状況を実現するためには 10^4 テスラという実現不可能な磁場が必要になる. 従って, 有機導体で実験的に見られている量子ホール効果を理論的に理解するためには, 半導体の 2 次元電子系の場合とは違った説明が必要である. また, 系が結晶の周期性を持ってそのことが電子系を考える場合に重要であるという点も異なる.

従来の有機導体での量子ホール効果に対する理論的説明は, は, Poilblanc et al. [1] によってなされた. 彼らは, FISDW の波数が磁場によって変化することと Streda の公式

$$\sigma_{xy} = \frac{e^2}{h} \frac{\partial N}{\partial H}$$

(ここで, e は電荷, h はプランク定数, N は化学ポテンシャル以下の状態を占有するの電子数, H は磁場の大きさ) を用いて, 量子ホール効果を説明した. また, Yakovenko [2] により, FISDWでのホール係数をトポロジカルな数 (チャーン数) と関連付ける議論もおこなわれている.

一方, 周期ポテンシャル中の電子やその極限としての強結合電子系に外部磁場が加えられたときには, 電子のエネルギースペクトラムは Hofstadter によって示されたような複雑な構造を持つことがよく知られている. ユニットセル当りの磁束数が p/q (p と q は互いに素である整数) という有理数で表されるときには q 個のバンドに分かれる. そのとき, 下から r 番目のバンドまでが完全に占有されると, ホールコンダクタンスは, Diophantine 方程式

$$r = qs + pt$$

の解を用いて,

$$\sigma_{xy} = -2 \frac{e^2}{h} t$$

と表される [3, 4]. ここでは, スピンの自由度に起因する係数 2 も含めて書いてある. このことは, t_b/t_a を摂動とみなしたとき, $k_x = -k_F$ と $k_x = k_F$ が t 次の摂動でつながれたと考えると容易に理解できる. (TMTSF)₂X でこの考えをそのまま用いると, 10^3 次程度の摂動を考えることになり現実的ではないように思える. 上で述べた, Poilblanc et al. や Yakovenko の議論と周期ポテンシャル中の電子系での量子ホール効果の理論との関係を明かにしようというのが目的である. それは以下のように説明される.

ハミルトニアン of 相互作用の項にスピン密度波の平均場近似を用いると, $k_x = -k_F$ と $k_x = k_F + N \frac{2\pi e b H}{hc}$ (b は b 軸方向の格子定数, $N = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ は, FISDW を特徴づける整数) が結合される. この効果と, t_b/t_a の N 次摂動と組み合わせるとフェルミ面にギャップを開くことができる. そしてそのときには, ホールコンダクタンスが

$$\sigma_{xy} = -2 \frac{e^2}{h} N$$

で与えられる。このことはまた、F I S D Wが存在するとスピン密度波のためにユニットセルが大きくなり、その結果、ユニットセル当りの磁束量子数が微小なものではなくなるのでDiophantine 方程式から決まるホールコンダクタンスが実現しているとみることでもできる。また、F I S D Wのオーダーパラメータがいくつか共存するとき [5] にも拡張することができ、Yakovenko [2] の議論と同様にホールコンダクタンスをワインディングナンバーで表すことができる。

半導体での整数量子ホール効果のプラトーの出現の説明には、不純物の効果による局在が必要とされている。また、エッジ状態の役割が重要であるという議論もある。それに対し、有機導体では、上で見たように、周期ポテンシャル中の電子の整数量子ホール効果が実現している。F I S D W状態では、エネルギーを下げるため化学ポテンシャルがいつもギャップ中にあるようにスピン密度波の波数が磁場によって変化するので、磁場が変化してもユニットセル当りの磁束数は一定にとどまり、ホールコンダクタンスがプラトーを持つようになるのである。また、3次元性は無視した議論を行ったが、3次元性があってもフェルミ面のネスティングを壊すほど大きくなければ、フェルミ面上でギャップが存在して上の議論がそのまま成立する。従って、3次元的な系で起こっている量子ホール効果である。

上に述べたように、ホールコンダクタンスは磁場変化に対してプラトーを持つが、磁場をさらに変化させると、F I S D W間で1次転移を起こして、別の状態に移ることが実験的にも理論的にも知られている。簡単なモデルで計算すると、磁場を増加させるにつれて、 $N = \dots, -4, -3, -2, -1, 0$ と変化していくことが分かり、ホールコンダクタンスもそれにもなって変化する。このことは(TMTSF)₂PF₆の実験と一致する。しかし、(TMTSF)₂ClO₄では、このような順番でF I S D Wが現れず、ある磁場の領域ではホール係数の符号が反転するという現象もみられる。モデルを用いた計算でも、パラメータの値を変えると（現実からはかけ離れたパラメータの値が必要になるが）、必ずしも $N = \dots, -4, -3, -2, -1, 0$ という順序で現れるわけではなく、符号が反転する例も作れる。ホール係数の符号が変化してもよいというのも、周期系の量子ホール効果の特徴である。(TMTSF)₂ClO₄に関しては、長田ら [5] によって、ClO₄イオン配列の秩序がF I S D Wの出現に重要な役割を果たすことを示され、実験事実をよく説明している。また、F I S D W相では、複数のオーダーパラメータが存在することも重要になるので [4]、これらのことから、(TMTSF)₂ClO₄でのホール係数の符号反転などが説明されると期待できる。

この研究は、町田一成、甲元真人、Victor M. Yakovenko 各氏との共同研究で、International

Conference on Physics and Chemistry of MOLECULAR & OXIDE SUPERCONDUCTORS (Eugene, Oregon, USA. 1993) のプロシーディングスとして出版予定である [7] .

参考文献：

- [1] D. Poilblanc, G. Montambaux, M. Héritier and P. Lederer, Phys. Rev. Lett. **58**, 270 (1987).
- [2] V.M. Yakovenko, Phys. Rev. B**43**, 11353 (1991).
- [3] D. Thouless, M. Kohmoto, M.P. Nightingale and M. den Nijs, Phys. Rev. Lett. **49**, 405 (1982).
- [4] M. Kohmoto, Phys. Rev. B**39**, 11943 (1989).
- [5] K. Machida, Y. Hori and M. Nakano, Phys. Rev. Lett. **70**, 61 (1993).
- [6] T. Osada, S. Kagoshima and N. Miura, Phys. Rev. Lett. **69**, 1117 (1992).
- [7] Y. Hasegawa, K. Machida, M. Kohmoto and V.M. Yakovenko, to be published in Proceedings of PCMOS'93 (Eugene 1993).