

ナノ構造における電子輸送

理化学研究所 石橋幸治

10年ほど前に観測された、微小金属リングにおける電子波の干渉の実験以来、メゾスコピック系（ナノ構造）の研究が盛んである。AB効果、コンダクタンスのゆらぎ（UCF）に代表される電子波干渉、コンダクタンスの量子化やホール効果の消失などのバリストック伝導、そして最近では、クーロンブロックード等の単一電子効果が注目されている。これらの多くは、量子力学の教科書の最初の部分に出てくる箱の中の電子や1次元のトンネル問題で直感的に理解できるが、それを実験で体験できるところが楽しい。また、現在の半導体デバイスの先に来るデバイスとして利用できる可能性もあり、工学的な観点からも注目されている。

これには、集積回路作製技術として培われてきた半導体超微細加工技術が重要な役割を果たしている。電子ビームを100Å以下に収束して、基板上にこれを走査する電子ビームリソグラフィ技術を用いれば、20nm程度のパターンをレジスト上に形成することができる。このレジストパターンを、リフトオフやエッチングにより基板に転写することにより、ナノ構造を作製する。すなわち、横方向には100nm程度の制御性を容易に得ることができる。また、分子線エピタキシ（MBE）や有機金属気相成長法（MOCVD）等の結晶成長を用いた縦方向制御に関しては、1nm以下の制御性が得られる。原子層エピタキシを用いれば、原子レベルで平坦な膜もできる。これらの結晶成長法を用いると、平均自由行程が100μmにもおよぶ2次元電子ガスを実現することもできる。最近では、走査トンネル顕微鏡（STM）を用いて、10nm以下、さらには原子を1個ずつ動かそうとする技術も開発されつつあることはよく知られたところである。

以上述べた微細加工技術を用いると電子の特徴的な長さである、波長、平均自由行程、非弾性散乱長などが、試料サイズよりも大きいといった状態が生じ、それによりマクロな試料では見られない様々な量子効果が見られる。これらのほとんどは、電子が本来持つ波動性と粒子性に根ざしている。

歴史的な順序に従うと、この分野の発展のきっかけになったのは、10年ほど前に行われたIBMのグループによる金属リングにおけるAB効果の観測である。同時に彼らは、金属細線においても磁気抵抗に不規則な振動を観測しており、これは今ではUniversal Conductance Fluctuations (UCF)と呼ばれており、半導体でも観測されている。AB効果にせよ、UCFにせよそのメカニズムは、不純物により散乱された電子波の干渉である。電子波の位相は磁場により変わるので、磁気抵抗にあらわれる振動は、電子波の干渉縞のようなものである。UCFのパターンは、不純物のミクロな配置をそのまま反映するから、マクロに同じ試料であっても試料が変わればそのパターンは異なる。これが、磁気指紋といわれるゆえんである。すなわち、このような試料では、導電率という言葉には意味がなく、コンダクタンスにのみ意

味がある。UCFのおもしろいところは、金属的であるならば、材料の種類や、試料サイズ、そして不規則性の度合いに関わらず、そのゆらぎの大きさが一定（コンダクタンスにして e^2/h ）であることである。UCFの存在の意味するところは、マクロとミクロの間に中間領域（メソスコピック領域）が存在することを実際に示した。すなわち、メソスコピック領域とは、ゆらぎが十分平均されずにまだ残っているような領域であるということが出来る。メソスコピック系で見られたゆらぎが平均により消えてゆき、マクロな系に移行する平均化のメカニズムはサイズによるものと温度による2種類がある。有限温度では、非弾性散乱が存在するからこれが干渉を弱める。従ってコヒーレントな領域は非弾性散乱長程度の領域に限られ、試料がこれよりも大きいと異なったコヒーレントな領域の間で平均が起こる。また、有限温度では電子のエネルギーが広がるからこれもコヒーレンスを悪くする。これに対応する長さスケールとして熱拡散長というのがある。以上が、UCFのだいたいの説明であるが、とにかく、メソスコピック系では電子波が非弾性散乱長程度の領域でコヒーレントに広がっている（非局所効果）。その例として、抵抗の対称性について紹介する予定である。

次に行われた実験は、いわゆる量子ポイントコンタクト（QPC）におけるコンダクタンスの量子化である。ここでQPCというのは、バリスティックな電子系に作られた細い（電子波の波長程度）くびれのことである。どのようにこれを作るかは講演で述べるが、くびれの幅を変化させながらその抵抗を測定すると、量子抵抗（ h/e^2 ）の偶数分の1のところステップが現れる。このことは、電子がくびれを通過するときに、導波管を通る電磁波のように電子波がモードを形成して通過することによる。したがって、全体の抵抗は、モードの数で決まるようになる。この例でも分かるように、バリスティック領域の電子輸送は電子波と電磁波のアナロジーでよく説明されることが多い。このほかにも、電子波に対するレンズやプリズム、さらに、ホール効果の消失に関する実験についても紹介する。

最近盛んになっている実験は、クーロンブロックードとよばれる単一電子トンネル効果である。これまで述べてきた電子の波動性に起因した現象に対して、単一電子トンネル効果では、電子の粒子性が重要である。クーロンブロックードというのは、非常に小さなトンネル接合において1個の電子の静電エネルギー（ $e^2/2C$ ）が熱エネルギー（ kT ）よりも大きくなる状況で、電子のトンネルが抑制（ブロック）される現象である。現在の微細加工技術で作製される $0.1\mu\text{m}$ 四方のトンネル接合では、クーロンブロックードが観測されるのはだいたい1 K以下である。熱的なゆらぎの抑制の他に、量子ゆらぎの抑制という要請から接合の抵抗が量子抵抗（ h/e^2 ）よりも大きいことが必要である。たった1個の電子数の変化が問題になるのだから、クーロンブロックードを議論する際には、それが電流バイアスだとか、電圧バイアスであるとか、あるいは外部回路にはなにがどのようにつながっているのかが重要である。このようなことは、電磁場環境の問題として理論的に議論されているが、筆者も難しいことはよく分からないので、直感的なことのみに述べるつもりである。

2つの微小トンネル接合で囲まれた量子ドットに、そのドットのポテンシャルを

変えるための第3ゲートを持つ構造を単一電子トランジスタ（SETトランジスタ）と呼び、クーロンブロッケードを調べるための最も基本的な構造である。この構造で見られる基本的な現象は、 $I-V$ 特性に現れるクーロンギャップ（電圧がゼロの付近）とクーロンステアケース、それと、ゲート電圧を変化させたときに見られるコンダクタンスのクーロン振動である。これらは、接合のトンネル確率にクーロンブロッケードを仮定すれば現象の大まかなところは理解できる。また、SETトランジスタでは1個の電子のトンネルを外部電圧で制御できることからいろいろな応用が考えられている。実際に実験されているものとして、ターンスタイルデバイスやポンプデバイスとよばれる周波数で決まる電流を与える電流標準への応用、1電気素量以下の電荷を検出する超高感度エレクトロメータ、さらには、単一電子メモリへの応用が行われている。また、ロジックデバイスへの応用も提案されており、工学の分野では、シングルエレクトロニクスという言葉が生まれている。ただし、それが実際にものになるかどうかは全く分からない。

以上のように、ナノ構造では電子の波動的な側面と粒子的な側面が1個の電子のレベルで体験できるといってよい。この分野の研究は新しい現象が次々出てきてめまぐるしかったが、現在のところは少し落ちついている。講演では、よく分かっていることについて基本的なことを述べるつもりであるが、最近の新しい研究としては、

- (1) バリステリック領域の細線やドットでのゆらぎ
- (2) 量子ドットの強磁場中での輸送（電子の波動性とクーロンブロッケード効果）
- (3) 超伝導電子のクーロンブロッケード
- (4) 超伝導体と正常金属との結合系（Andreev反射など）
- (5) 量子ドットのAC効果

などがある。今のところ、筆者も勉強しているところであり、まだまだ理解してないところが多いが、分かる範囲で実験を中心に紹介する予定である。

参考文献としては総合的なもののみをあげておく。

- 1) 小林俊一、小森文夫： 応用物理 60、450 (1991)
- 2) 石橋幸治、青柳克信、菅野卓雄： 応用物理 63、104 (1994)
- 3) S.Washburn and R.A.Webb: Adv. Phys. 35, 375 (1986)
- 4) C.W.J.Beenakker and H.van Houten: Solid State Electronics, 44, 1 (1991)
- 5) D.V.Averin and K.K.Likharev: in Mesoscopic Phenomena in Solids, ed. by B.Altshuler, P.A.Lee and R.A.Webb (North Holland, Amsterdam, 1991)