



# 原子架橋の量子輸送現象

笠井 秀明\*

## Quantum Transport Phenomena in Atom Bridge

Key Words : Atom Bridge, Quantum Transport, Electron Correlation, STM

### 1. はじめに

最近、走査トンネル顕微鏡 (STM) による原子操作や原子サイズの微細領域での物性計測など新しい物性研究が活発になっている。例えば、1) STMを使って、Cu, Ag, Auなどの金属表面にFe, Co, Ceなどの磁性原子を置き、これらの電子系のスペクトロスコピーや実空間像の観察が行われている<sup>1, 2)</sup>。これによって近藤効果の実像が明らかになる可能性がある。2) 固体表面にCO, NOなどの気体分子を吸着させ、STM探針を使って、吸着分子の非占有局在軌道に電子を置く。この電子のフェムト秒オーダーの素早い表面への移動に伴い、誘起される吸着分子の脱離が観測されている<sup>3, 4)</sup>。これによって超短時間・微細領域での反応素過程の制御が現実的になってくる。3) STM探針を上手く操作し、探針と固体表面間に原子サイズの接合部分を形成する。この接合部分での量子輸送現象が調べられている<sup>5-8)</sup>。これらは、筆者らの理論物性学研究グループにおいても注目している興味深い研究である。1) 2) については他の機会に譲ることにして、以下では3) について簡単に述べる。

### 2. 原子架橋の量子輸送現象

STM探針を固体表面に押しつけ徐々に引き上げると、STM探針が原子サイズであるため、断面が

数個から数十個程度の原子からなる接合部分(量子細線, 原子架橋と呼ぶ)が形成される。引き上げ距離が数nm程度まで接合が保たれた状態で原子架橋は伸び、それ以上引き上げると最終的には断線する。

この原子架橋のコンダクタンスが、探針引き上げ距離の関数として1994年に初めてL. Olesenら<sup>5)</sup>によって測定された。その結果、コンダクタンスが階段状の変化を示しながら減少して行くことが見出された。このようなコンダクタンスの階段状の変化については、1988年にB.J. van Weesら<sup>9)</sup>によって、GaAs/AlGaAs半導体ヘテロ接合界面に形成される2次元電子系で観測されていた。半導体表面に取り付ける金属ゲートの形状や印加電圧を制御することで、電子に作用するポテンシャルを変化させ、界面での電子の存在領域の形状を点状接触や量子細線とし、コンダクタンスが測定された。その結果、ゲート電圧の関数としてコンダクタンスは階段状の変化を示すという有名なコンダクタンスの量子化が発見された。

半導体ヘテロ接合界面の量子細線やSTM探針と表面間の原子架橋のコンダクタンスが量子化される原因は次のように説明される。電子の流れる方向(細線方向)に垂直な方向では、線幅が狭いため、電子状態は量子化される。この量子化エネルギーに電流方向の一次元的なバンド・エネルギーが加わって、電子系のエネルギー状態は複数のサブバンド構造を持つことになる。これらのサブバンドの中でフェルミ・エネルギーと交差するサブバンドが電流に寄与するが、各サブバンドのフェルミ・エネルギーを持つ電子の速度と電子状態密度の積がユニバーサルな値 $e^2/h$ となるので、これにスピン縮退を考慮すれば、各サブバンドは $2e^2/h$ の寄与をすることになる。したがって、系全体のコンダクタンスは、フェルミ・エネルギーと交差するサブバンド数 $N$ をこれに掛け

\*Hideaki KASAI  
1952年1月23日生  
1981年大阪大学大学院工学研究科・  
応用物理学専攻・後期課程中退  
現在、大阪大学大学院・工学研究科・  
応用物理学専攻・物理学講座、  
教授、工学博士、理論物性学  
TEL 06-6879-7857  
FAX 06-6879-7859  
E-Mail kasai@dyn.ap.eng.  
osaka-u.ac.jp



た値 $2Ne^2/h$ となる。低温での実験結果は、プラトー領域でのコンダクタンスの値がほぼこれと等しい値を示した。

サブバンドのエネルギー間隔は細線部分の幅に依存しており、半導体ヘテロ接合界面の点状接触や量子細線の場合には、それが数百nm程度であり、エネルギー間隔が温度に換算すると数Kしかない。したがって、低温ではこの量子化は見えているが、温度上昇に伴いコンダクタンスの階段状の急峻な変化は抑制され、滑らかな変化となり、さらに室温では階段状の変化を見ることができなくなる<sup>10)</sup>。(図1参照)一方、STM探針と固体表面間に形成された原子架橋の場合には、その断面が数個から数十個の原子からなっており、半導体ヘテロ接合界面の量子細線と比べて、サブバンドのエネルギー間隔はかなり

広がっている。このため、この系では室温においてもコンダクタンスの量子化が観測された。STM探針と固体表面間の原子架橋においては、原子架橋全領域にわたって断面を同じ形状にすることは難しい。断面形状の不揃いは伝導電子の散乱の原因となり、コンダクタンスの階段状の変化を崩す原因となる<sup>8)</sup>。また、このような微細領域に閉じ込められた電子間には強い電気的な反発力(電子間クーロン相互作用)が働く。このような原子サイズの形状に起因する効果、電子間クーロン相互作用に起因する効果が上記のコンダクタンスの量子化にどのような影響を及ぼすかを調べることは、大変興味深い。さらに、エレクトロニクスのサイズ縮小の要請が原子サイズにまで及ぶことになれば、これらの効果が応用面でも重大な影響を及ぼすので、その詳細な検討が

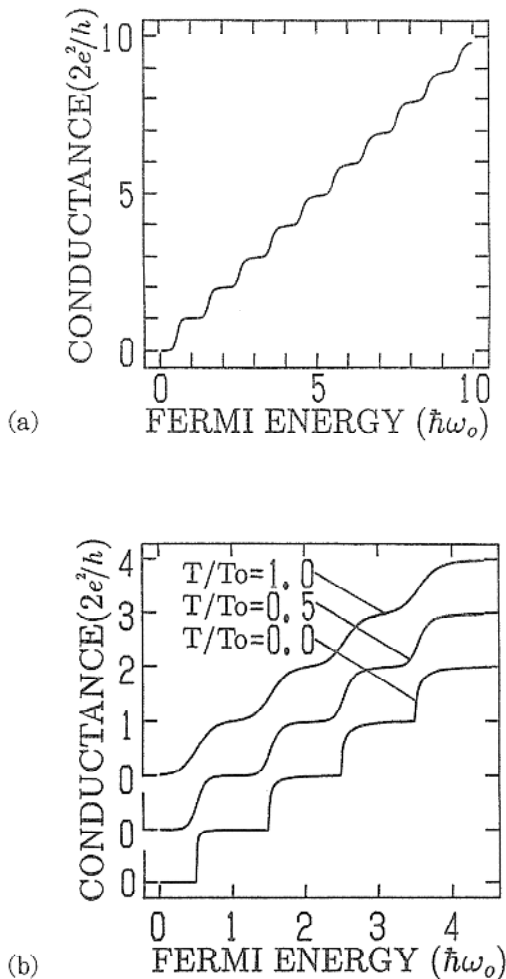


図1 コンダクタンスのフェルミ・エネルギー依存性 a) ( $T/T_0=0.5$ ) b) ( $T/T_0=0, 0.5, 1.0$ ).  $T$ は温度,  $T_0$ は量子細線の線幅で決まる特徴的な温度で, GaAs/AlGaAs半導体ヘテロ接合界面の量子細線で線幅 $\sim 100\text{nm}$ のとき, およそ1K. (文献10より転載)

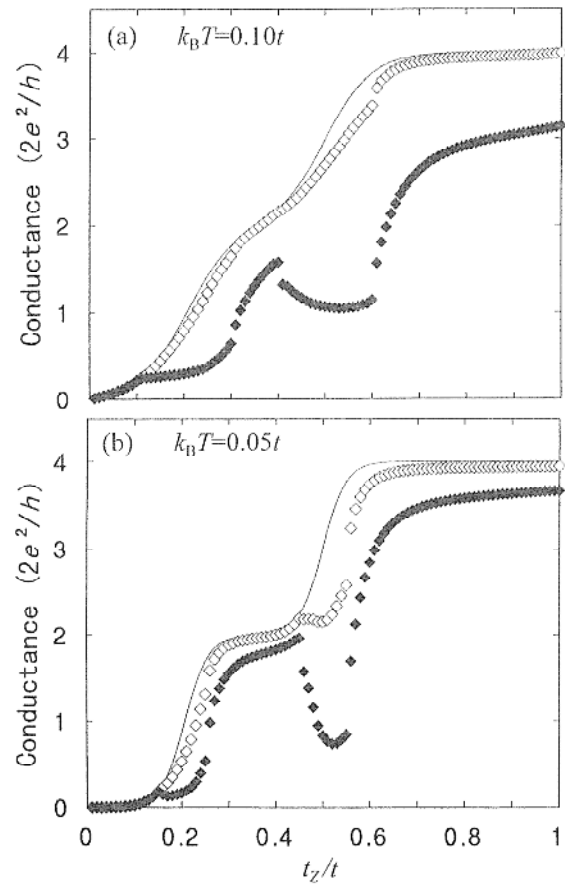


図2 コンダクタンスの $t_z$ 依存性に現われる電子間クーロン相互作用の効果 a)  $k_B T=0.10t$ , b)  $k_B T=0.05t$ .  $t_z$ は電流方向の最近接格子点間の電子の飛び移り積分の絶対値で, 探針引き上げに伴い $t_z$ は減少する。したがって, 図の右から左への変化は探針引き上げ距離の増加に対応している。  $t$ は電流に垂直方向の最近接格子点間の電子の飛び移り積分の絶対値である。電子間クーロン相互作用  $U$ を無視した場合(実線),  $U=0.2t$ (白四角印),  $0.5t$ (黒四角印)の場合の結果。(文献7より転載)

必要となってくる。そこでこれらの効果が量子輸送現象に及ぼす影響を調べてみた。得られた結果の詳細については文献<sup>6,7,8)</sup>を見ていただくことにして、以下には電子間クーロン相互作用に起因する効果について明らかになったことを要約する<sup>6,7)</sup>。

電子間に働くクーロン相互作用のため、電子は互いに避け合いながら運動する。したがって、電子が互いに独立な運動をするという一電子的な描像が成り立たず、電子間に散乱が生じる。この電子間の散乱による効果は有限温度で、伝導に寄与するフェルミ・エネルギーを持つ電子の寿命を有限にし、プラトー領域でのコンダクタンスの値を、ユニヴァーサル値( $2Ne^2/h$ )からずらす。(図2参照)また、ステップ近傍では、一次元系特有の個々のサブバンドのエネルギー状態密度の大きい部分がフェルミ・エネルギーに近接するので、電子間の散乱確率が增大するため、電子の流れが抑制され、窪み構造がコンダクタンスの探針引き上げ距離依存性に現われる。(図2参照)

このように、STMを使って作成される原子架橋や様々な微細構造では、室温においても発現する形状に起因する量子効果と強い電子間クーロン相互作用に起因する効果が絡むため新奇な物性が期待できる。

### 3. お わ り に

STMの発明とその後の関連技術の飛躍的な進歩によって、物性研究の中心課題の一つとして微細領域物性がターゲットになっている。このような研究においては定量性、再現性のある実験が極めて困難なため、理論の役割も大切であり、実験と理論の協力によって大きな成果が得られると期待している。ここで述べた原子架橋の量子輸送現象に関する研究は、興地斐男先生(大阪大学名誉教授、和歌山工業高等専門学校長)、中西 寛氏(大阪大学助手、工学

研究科、応用物理学専攻)、大阪大学大学院工学研究科学生であった川人洋介氏(松下電器産業(株)産業技術部)との共同研究の一部であり、有益な議論に感謝します。最後に、日頃の有益なご教示、援助そして激励に対して、興地斐男先生に深く感謝します。

### 参 考 文 献

- 1) M. F. Crommie, C. P. Lutz and D. M. Eigler, *Science* 262 (1993) 218.
- 2) T. Kawasaki, H. Kasai and A. Okiji, *Phys. Lett. A* 250 (1998) 403.
- 3) L. Bartels, G. Meyer, K. -H. Rieder, D. Velic, E. Knoesel, A. Hotzel, M. Wolf and G. Ertl, *Phys. Rev. Lett.* 80 (1998) 2004.
- 4) K. Hasegawa, H. Kasai, W. A. Dino and A. Okiji, *J. Phys. Soc. Jpn.* 67 (1998) 4018.
- 5) L. Olesen, E. Lagsgaard, I. Stensgaard, E. Besenbacher, J. Schiotz, P. Stoltze, K. W. Jacobsen and J.K. Nørskov, *Phys. Rev. Lett.* 72 (1994) 2251.
- 6) Y. Kawahito, H. Kasai, H. Nakanishi and A. Okiji, *Surf. Sci.* 409 (1998) L709.
- 7) Y. Kawahito, H. Kasai, H. Nakanishi and A. Okiji, *J. Appl. Phys.* 85 (1999) 947.
- 8) H. Kasai, T. Kakuda and A. Okiji, *Surf. Sci.* 363 (1996) 428.
- 9) B. J. van Wees, H. van Houten, C. W. J. Beenakker, J. G. Williamson, L.P. Kouwenhoven, D. van der Marel and C. T. Foxon, *Phys. Rev. Lett.* 60 (1988) 848.
- 10) A. Okiji, H. Kasai and A. Nakamura, *Prog. Theor. Phys. Suppl.* 106 (1991) 209.

