

「量子効果等の物理現象」  
平成7年度採択研究代表者

青野 正和

(大阪大学大学院工学研究科 教授、理化学研究所 主任研究員)

## 「人工ナノ構造の機能探索」

### 1. 研究実施の概要

本研究を実施する目的は、様々な興味深い機能が期待される人工ナノ構造を設計し構築し、かつそれらが示す機能を新しい計測法の開発によって積極的に計測・評価して、人工ナノ構造の新しい機能を探索し、ナノサイエンスとナノテクノロジーの世界にブレークスルーをもたらすことにある。

### 2. 研究実施内容

研究は次の6つのグループが密接に協力し合って進めたが、各グループが責任をもって進めた研究の内容は次の通りであった。

#### グループA

平成10年度までに独立駆動3探針STM(TT-STM)を建設してその基本動作の確認を終え、平成11年度はそれを用いて電子輸送特性の測定を開始した。結果の例として、2本の探針を接触電極として、対照的な2種類の半導体表面、すなわちSi(111)7×7とSi(111)3×3-Agの電気伝導度を2探針の距離の関数として測定したところ、予期しなかった複雑な結果が得られ、その解析から興味深い事実を見出すことができた。また、平成10年度までに建設した新しいモードのスピンの偏極STM(SP-STM)を用いて、ナノスケールでの磁性観察を行った。例として、Si(111)7×7表面が磁性体であることを示す兆候を得た。さらに、放出光の分光検出が可能なSTMを用いて、トンネル電子注入によってナノ構造から誘起される光の像観察と分光を行い、幾つかの興味深い結果を得た。興味深い人工ナノを作成する研究として、STMの探針による局所刺激をトリガーとする連鎖重合反応によってパイ共役有機重合分子鎖を任意の位置に作成する技術の開発に初めて成功した。C60の単分子膜、2分子膜を局所に線状に重合して導電パスを作成する努力も続けた。イオン電子混合伝導体をナノ電極ギャップの片方に使用すれば、印可電圧の極性によってそのギャップを原子架橋によってオン・オフできる可能性があることを示唆する結果も得た。

#### グループB

分子スケールで局所に与えた刺激をトリガーとする分子の連鎖重合反応によっ

て導電性の分子鎖を形成する技術の開発を行うための STM 装置を建設した。分子の熱振動を抑制してよく制御された実験を行うため、低温冷却機構も整備した。これと平行して、導電性の分子鎖を作成する舞台である単分子膜においてその分子膜の分子の配向や周期性を制御する研究を行った。異種の分子の混合、外来の分子や原子の添加などによって制御が可能であることが判明してきた。例として、テトラコサジン酸の単分子膜は、水分子の添加によって分子配列の周期が 2 倍になり、クラウンエーテルの単分子膜はアルカリ金属原子の添加によって分子配列の周期がやはり 2 倍になる。

#### グループ C

半導体の表面の電気伝導に関して、4 探針法を用いたユニークな研究を展開し、様々な興味深い結果を得てきている。例として、Si (111)  $3 \times 3$ -Ag 表面上に少量の Au, Ag, Cu, Li, Na, K, Cs などが付加されると、 $21 \times 21$  構造が共通に形成されるが、それらは同じメカニズムで高い電気伝導度を示す。また、Si (111)  $3 \times 3$ -Ag 表面を 6 K の低温で STM 観察したところ、電子の定在波が明瞭に観測され、これは表面電子準位バンドによる電気伝導現象を目に見える形でデモンストレーションするものである。さらに、約 1 原子層の Pb を吸着した Si (111) 表面の構造が約 200 K で構造相転移し、それに伴って表面電気伝導度が著しく変化する。これらの表面電気伝導に関する研究をさらに押し進めるため、マイクロ 4 プローブ電気伝導測定装置を開発した。これを用いて、半導体の表面電気伝導は、電流の流線が表面のステップバンチに平行なときと垂直なときとで大いに異なることが見出された。

#### グループ D

分子を個々に操作することによって機能性分子ナノ構造を創製し、その機能を探索するために、分子の操作と下地の構造修飾を制御よく行い低温 STM を建設してきたが、間もなく最終的な完成に至る予定である。これに関連した別の研究によって、水素原子で終端された Ni (110) 表面上に独特の直線構造が STM 探針の走査によって誘起されることが見出された。

#### グループ E

ナノスケールのアトムリレートランジスターの実現を目指して、その構造構築と電極接続に関する研究を進めている。一方、ナノスケールの電子デバイスとの関連で、STM を利用した極微細加工と STM の像観察をうまく組み合わせ、Si (111)  $7 \times 7$  表面の表面電子準位を介した電気伝導の観察を行い、それが確かに存在することを如実に示す実験結果を得た。これによって、Si (111)  $7 \times 7$  表面では最外層として金属的な表面状態層があり、その下に電気伝導度の小さいバリアー層があり、そしてその下にバルク伝導の領域が続くことが明瞭に示された。

## グループE

様々なナノ構造の興味深い機能を理論的に探索してきた。それを通して、実験グループとの密接な協力も行っている。これまでに次のような興味深い結果を得た。2つの金属電極が原子鎖によって架橋されている場合の量子化電気伝導を、開発したリカージョン伝達行列法を用いて、原子鎖を構成する原子の個性までも取り入れて解析することに成功し、量子化電気伝導のミクロスコピックな理解に達することができた。固体表面に非磁性原子で構成された鎖が強磁性を示す可能性があることが分かった。2つの金属電極がある種の分子によって架橋されその分子を通して電流が流れるとき、その分子の中に大きな渦電流が流れる可能性があるという興味深い事実が判明した。

### 3. 主な研究成果の発表 (論文発表)

R. Tamura and M. Tsukada " Band structures of periodic carbon nanotube junctions and their symmetries analyzed by the effective mass approximation", J. P.hys. Soc. Japan, 68 (1999) 910.

S. Heike, Y. Wada , and T. Hashizume, "Correlation between tip-apex shape and surface modification by scanning tunneling microscopy", J. Appl. Phys., 86 (1999) 4220.

Y. Wada, "Prospects and problems of single molecule information devices", Jpn. J. Appl. Phys.,

T. Kobayashi, C. F. McConville, G. Dorenbos, M. Iwaki, and M. Aono, "Depth profile and lattice location analysis of Sb atoms in Si/Sb( -doped)/Si(001) structures using medium-energy ion scattering spectroscopy", Appl. Phys. Lett., 74 (1999) 673.

K. Hashimoto, T. Nakayama, N. Yoshimoto, M. Yoshizawa, M. Aono, and I. Yamaguchi, "Three distinct terraces on a  $-(\text{ET})_2 \text{I}_3$  surface studied by scanning tunneling microscopy", Jpn. J. Appl. Phys., 33 (1999) L464.

T. Nakayama, J. Onoe, K. Takeuchi, and M. Aono, "Weakly bound and strained  $\text{C}_{60}$  monolayer on the  $\text{Si}(111) \sqrt{3} \times \sqrt{3} \text{R}30^\circ$ -Ag substrate surface", Phys. Rev., B59 (1999) 12627.

S.-H.- Wu, T. Nakayama, S. Qiao, and M. Aono, "Strong linear polarization in scanning tunneling microscopy-induced luminescence from porous silicon", Appl. Phys. Lett., 74 (1999) 3842.

尾上 順、中山知信、武内一夫、青野正和、"フラーレン光重合ポリマー： 現状と展望"、季刊フラーレン、7 (1999) 129.

C. -S. Jiang, T. Nakayama, and M. Aono : "Spatially resolved observation of coulomb blockade and negative differential conductance on a Ag cluster on the clean GaAs(110) surface", Appl. Phys. Lett., 74 (1999) 1716.

櫻井 亮、青野正和:"シリコンダングリングボンドからなるナノ構造のSTM誘起発光"、表面科学、20 (1999) 716.

橋本克之、中山知信、吉本則之、吉澤正人、原 正彦、青野正和、山口一朗:"有機導体  $(\text{ET})_2\text{I}_3$  表面ステップの安定性と走査トンネル顕微鏡探針による分子除去"、真空、42 (1999) 245.

X. Tong, C.-S. Jiang, K. Horikoshi, and S. Hasegawa, : "Surface-state electrical conduction on the Si(111)-  $3 \times 3$ -Ag surface with noble-metal adatoms", Surface Science 449,(2000) 125.

N. Sato, T. Nagao, and S. Hasegawa,; "Two-dimensional adatom gas phase on the Si(111)-  $3 \times 3$ -Ag surface directly observed by scanning tunneling microscopy", Phys. Rev. B60 (1999)16083.

K. Tsuchie, T. Nagao, and S. Hasegawa, : "Structure of C60 layers on the Si(111)-  $3 \times 3$ -Ag surface", Phys. Review B<sub>60</sub> (1999) 11131.

H. Aizawa, M. Tsukada, N. Sato, and S. Hasegawa, ; "Asymmetric structure of the Si(111)-  $3 \times 3$ -Ag surface", Surface Science 429 (1999) L509.