

4-2 単一有機分子エレクトロニクス

4-2 *Single Molecular Electronics*

久保田 徹 永瀬 隆 長谷川裕之 益子信郎

KUBOTA Tohru, NAGASE Takashi, HASEGAWA Hiroyuki, and MASHIKO Shinro

要旨

近年、ナノテクノロジーの進展に伴い、情報通信分野における電子素子として、量子効果などに基づく新規な電子素子、高機能電子素子の提案や開発が進んでいる。その一つとして、微小なドットを電子トンネル層中に配置した構造を持つ、単一電子トンネル(SET)素子が上げられる。SET素子は、メモリー素子、スイッチ素子などへの応用が考えられ、次世代の情報通信素子への可能性を持つ。このSET素子の微小中間電極として、色素などの有機分子を用いることにより、単一の有機分子の持つ特徴的な電子・光機能を、SET素子特性に取り込むことが可能となる。本報告では、単一有機分子エレクトロニクスを目指した、有機分子を用いた様々な形のSET素子の試作とその電子・光特性について紹介する。

In recent years, nano-technology may lead to a new way to electronics and many novel electronic devices in the field of information and communications technology. One of these nano-devices, single electron tunneling device using small particles in their systems have been successfully prepared, high-density memory devices, high-speed low power switching devices, high-sensitive electrometer devices and others will be produced in near future. However these are not sufficient. Using an organic molecule as a coulomb island electrode, it is possible to use a potential ability of the molecules. In the present paper, we fabricate the some types of organic SET device, using organic and inorganic insulator, and ultra-narrow nano-gap electrodes, and investigate the electrical properties of these single electron tunneling devices with or without light irradiation. We are making effort to adding specific optical and electronic properties coming from individual organic molecules to our single electron tunneling devices.

[キーワード]

有機エレクトロニクス, 単一電子トンネル素子, 有機分子, 光ゲート, ナノギャップ電極
Molecular electronics, Single electron tunneling device, Organic molecule, Light gate device, Nano-gap electrodes

1 まえがき

1.1 有機分子エレクトロニクス

有機分子のエレクトロニクスへの応用は、かつては絶縁体などの受動的なものが主流であり、エレクトロニクスの中で非常に重要な材料ではあったが、素子特性の主流をなすものではなかった。現在の情報システム技術を支える、いわゆる「固体エレクトロニクス」技術、材料においても、有機分子は主に、その絶縁機能や誘電機能に着目した素子材料として、電子部品、電

子絶縁材、被服材に用いられてきた。

そのような中で、有機分子を能動的な電子素子(例えば整流素子、トランジスタ素子など)に応用しようとする、有機分子を材料とした有機分子エレクトロニクスというものが提案され、研究の対象となって数十年がたっている。当初提案された有機分子エレクトロニクス素子は、提案ということもあって、合成された分子一つの中での電子機能(整流機能やトランジスタ機能など)を発現させようというものであった[1]。これにより、従来のSiデバイスの限界を打ち破る

うというものであったと思う。当時では、提案されたような、単一の分子による素子を実際作成し、その機能を実証することは不可能であったといえる。つまり、電子計測機器などの外部環境から、ナノ又はサブナノスケールの超微小な単一分子への電子的アクセスやコンタクトの問題、分子合成の面からは、電子機能基を一つの分子内に有するような、比較的大きな分子を合成する技術の問題などがあったためである。そのため、初期の有機エレクトロニクスの研究は、比較的作成が容易な、分子集合体による研究がなされてきた。そのような多くの材料、素子、界面などの研究から、今日では、液晶やEL素子など、多くの実用有機デバイスが形作られてきている。近年、このような実用デバイスにも、有機物質の特徴的な機能である、フレキシブル性、軽量性、経済性、多様性など様々な要素が付加され、研究も進み、今後の有機デバイスを作製する上でも重要なファクターとなってきている。そして、現在では、これらの分子結晶、分子薄膜、高分子薄膜の機能を、更に微小な領域、ナノレベルで発現しデバイスを形成していこうという研究が盛んになってきている。実用化に向けた研究が進む有機FETの開発などは、フレキシブル性が大きく取り上げられるが、その性能向上には、ナノレベル、分子レベルでの物性制御が重要であると言われている。

1.2 単一分子エレクトロニクス

このような中で、有機分子膜を微細化(トップダウン)又は有機分子を組織化(ボトムアップ)する技術や、STMやAFMなどの、分子を直接評価、アクセスできるツールの開発も進み、当初の有機分子エレクトロニクス素子の提案であった、単一の分子に能動的な電子機能を持たせる、「単一分子デバイス」といえるものを創製する基礎が、研究段階ではあるが十分に整ってきている。実際、単一分子の電子特性を評価したとされる研究[2]-[4]なども幾つか見られてきており、今後は、これらの研究を技術や評価で終わらせることなく、当初の有機分子エレクトロニクスの姿である単一分子デバイスの作製研究に応用していく時期にきていると思われる。今後、よ

り多くの研究者が、有機分子物性評価にとどまらず、デバイスのイメージをより強く持ち、そしてよりチャレンジングな研究を進めていくことが望まれる分野となってきている。

では、単一分子エレクトロニクスやそれに基づいた電子システムを創成していくために、どのような能動的電子機能を単一の分子に求めていくべきであろうか。その一つの答えとして、当研究グループでは、通信における次世代の有機電子素子の実現を目指し、有機物質単体の特徴を生かし、かつ従来のSi系無機材料には実現が困難な特徴を求め、有機分子を用いた単一電子トンネル(SET)素子の開発を行っている。SET素子自体は、トンネル障壁中に形成した超微粒子を中間電極とした構造を持ち、メモリー素子、高速・低消費電力スイッチング素子、微小エレクトロメータ素子などへの応用が考えられている[5][6]。そして、半導体素子の超微細化技術の進展とともに、量子効果を基礎とした新しい素子開発が進んでいるなかで、無機半導体系材料においても大きな研究分野の一つとなっている。このような特徴に加え、有機分子を用いることにより、有機分子の特徴である、超微小性、光応答性、自己組織性、柔軟性などを付加させることが可能となり、従来のSET素子の特徴を最大限に生かしつつ、新規な機能の実現が可能となる。本報告では、有機分子の超微小性、光応答性に着目し、単一有機分子をSET素子の中間電極として用いた素子の研究を紹介するとともに、有機SET素子の可能性について触れていく。

2 有機分子を中間電極とした単一電子トンネル素子の開発 [7]-[10]

先にも述べたように、有機分子を用い、分子単独の電子機能、光機能を引き出し、電子・光素子に応用する分子エレクトロニクスの研究が進んでいる。なかでも、単一分子の機能に着目し、電子素子応用を図る単一分子エレクトロニクスにおける単一電子トンネル(SET)素子の研究は、多くの素子応用とともにシステム化などへの展開も研究されつつある研究分野の一つとなっている。

2.1 単一電子トンネル素子

単一電子トンネル素子とは、クーロンブロッケード現象を利用して、電子1個1個の移動現象を制御できる素子のことをいう。図1(a)のように、トンネル伝導をする素子の二つの電極間に微小な中間電極を配置すると、中間電極に電子が存在する場合、中間電極の電子帯電エネルギー $e^2/2C$ により、中間電極へのトンネル電子移動が制限される。そのため、電流輸送の離散性が顕著に現れ、一般的な電子素子とは異なる機能的特徴を持つことになる(図1(b))。しかし、このような電子特性を得るには、電子帯電エネルギー $e^2/2C$ を熱エネルギー kT 以上にする必要がある。そのため、中間電極として機能する微小粒子の大きさを、数nmの大きさ、電気容量として $10^{-18}F$ 以下に加工する必要がある[11][12]。そこで、この微小中間電極として、大きさが既に数nmという微小な有機単一分子を用い、有機分子素子の一つとして試作を行った。有機分子を中間電極として用いた場合、超微小な中間電極を容易に作製できることに加え、色素分子などを用いれば、分子自体の持つ電子・光機能をSET特性に付加することも可能となり、無機物質を用いた素子にはない新しい機能が発現する

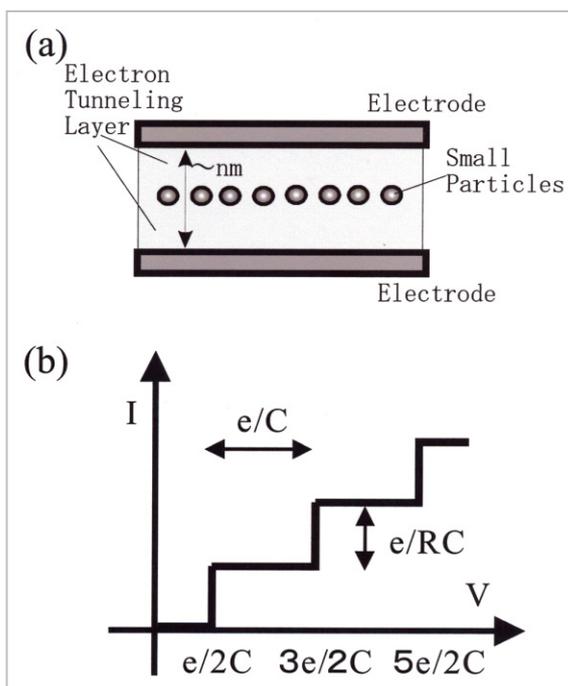


図1 単一電子トンネル素子の構造(a)とI-V特性(b)

可能性も出てくる。

2.2 有機単一電子トンネル素子の試作

ここでは、当初研究を行った有機分子による電子トンネル層と、色素有機分子を中間電極に持つ有機単一電子トンネル素子の試作とその電子特性について述べる。電子トンネル層は必ずしも有機分子を用いる必要はないが、次節に述べる光異性化スイッチングやフレキシブル性など今後の素子応用への展開を考え、有機電子トンネル層を採用した。後述する光スイッチ型の単一電子トンネル素子では、歩留まりの向上や高温動作、メモリー素子への展開などを考え、無機トンネル層を採用している。

2.2.1 素子及び実験[8]

素子作製に用いた分子は、近年有機合成の分野で注目されている dendritic 分子を中間電極に、またトンネル障壁には、良好な電子トンネル障壁として機能することが知られ[13]、LB法により単分子膜厚(0.4 nm)制御が可能な、ポリイミド(PI) LB膜[14]を用いた。中間電極として用いた dendritic 分子は、ローダミン色素分子の周りを電気的に絶縁性のCH基で覆った球殻分子構造を持つ。そのため、中心に存在する色素分子を、外界と電気的に隔離することが可能となる。つまり、本分子は今後、単一の有機分子として素子作成を行う際には、分子に直接電子的なアクセスを行うことにより、有機単一分子単一電子トンネル素子となる可能性を持つ。また、分子自体も疎水性CH基で覆われているため、会合しにくい分子であることも分かっており[15]、本素子形状においても、電子的に単一分子素子として動作する可能性がある。図2に今回用いた有機分子の構造を示す。

以上の有機分子を用い、ローダミン色素 dendritic 分子を中間電極層とした、図3に示す素子構造を持つ、単一電子トンネル素子を作製した。素子はガラス基板上に作成し、上下 Au 電極は蒸着法により、電子トンネルPI層はLB法により作成した。中間電極層は、ローダミン dendritic 分子を混合した PILB 膜を単分子層累積した。分子混合比は、Rh-G2分子を中間電極として機能させるため、分子同士が会合しないよう、希薄な状態とするため、PI:Rh-G2 = 500 : 1 とし

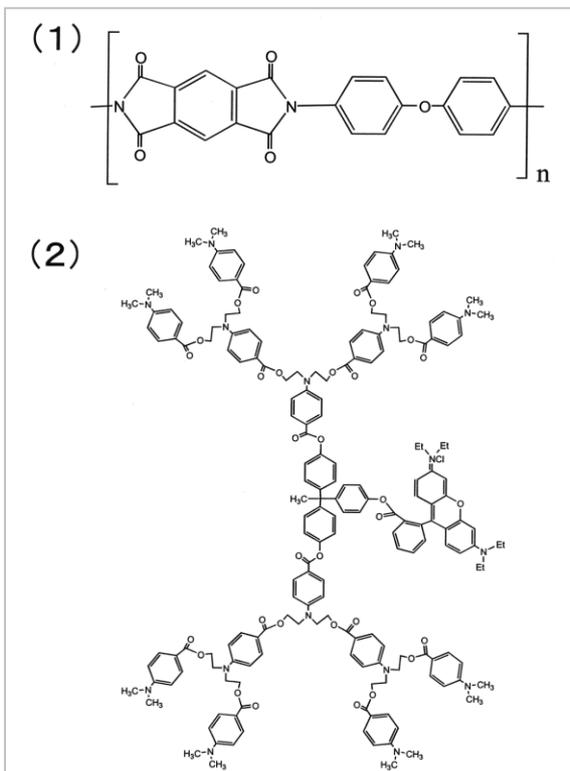


図2 使用分子の構造
(1)ポリイミド(PI)
(2)ローダミンデンドリマー(Rh-G2)

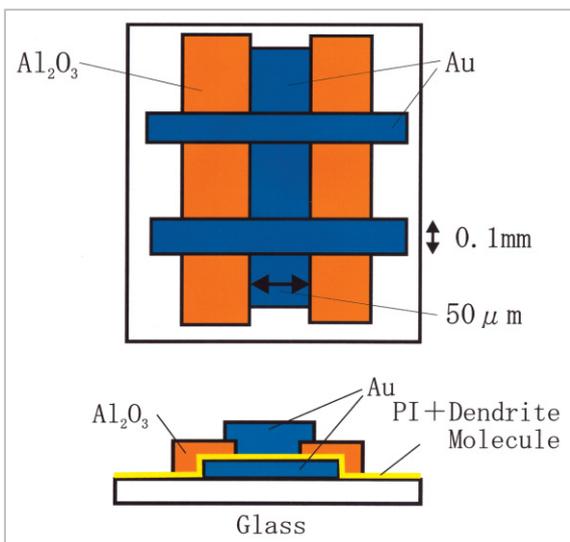


図3 試作した有機単一電子トンネル素子構造

た。分子占有面積の実験から、この分子比率において、ほぼ1μm角の面積中にRh-G2分子が1000個程度存在することになり、有効に中間電極として機能すると考えられる。これにより、素子面積約50×100μm角の素子が形成される。作成した素子は、素子抵抗が数100M-数十GΩとなるため、測定は2端子法を用い、クライオス

タット中、一定温度の下でステップ電圧を印可して測定を行った。

2.2.2 単一電子トンネル素子特性

図4に測定した、Au/PI25/PI+Rh-G2/PI30/Au素子の、温度5.2KにおけるI-V特性を示す。SET特性の特徴である等間隔の電圧ステップが明確に現れているのが分かる。SET現象に基づくステップの電圧幅は、中間電極と電極間の容量をCとすると、 e/C の一定電圧幅となる[11][12]。図を見ると、その電圧の幅は、0次、1次とも約100mVとなっており、明らかにSET特性が発現したと思われる。これを明確にするために、図データの差分を計算し、プロットしてみると、図4(b)となる。正負の電圧とも、50、150、250mVに、等間隔に dV/dI のピークが見られ、その特性が顕著に見られることが分かる。

次に、素子のトンネル伝導についてみるため

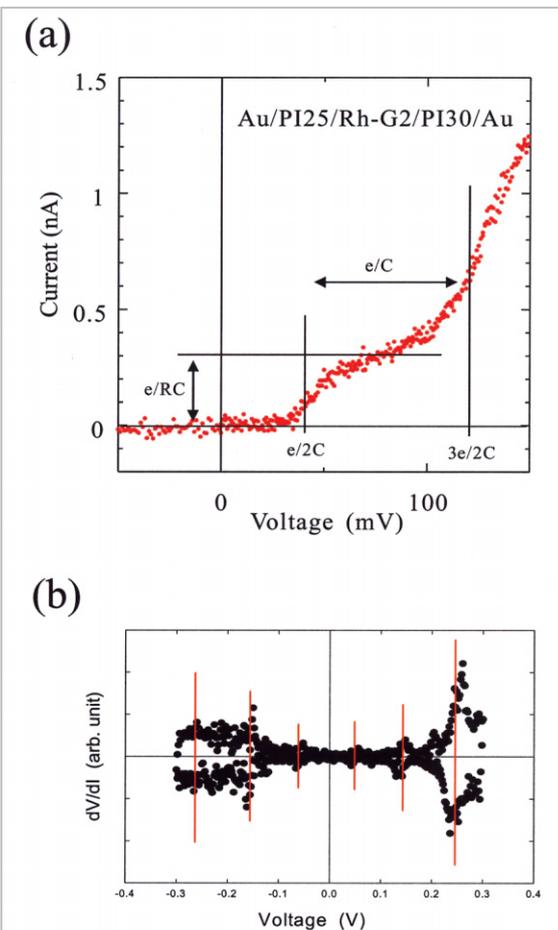


図4 (a)Au/PI/Rh-G2/PI/Au構造素子のI-V特性
(b)Au/PI/Rh-G2/PI/Au構造素子の dV/dI -V特性

に、素子の温度特性を測定した。その結果を図5に示す。図を見ると、室温から50Kまでは温度の低下とともに電流が減少しており、熱活性化型の電気伝導特性であることが分かる。しかし、更に温度を下げていくと、50K以下では電流値の変化はほとんど観測されず、トンネル伝導型の電気伝導を示していることが分かる。50K以上の熱活性化エネルギーを計算すると30meV以下の非常に小さな値となっている。このことから、この素子では熱活性化型とトンネル型の伝導成分が存在し、室温で支配的であった熱活性化型の電気伝導成分が温度を低下させることにより徐々に抑制され、トンネル伝導型の電気伝導が支配的となり、最終的に図4のようなSET特性が得られたものと考えられる。そこで、このことを確認するために、各温度において温度一定の下でI-V特性を測定した。その結果を図5(b)に示す。トンネル伝導型の電気伝導を示す50Kを境にして、低温側では単電子トンネル特性である電圧のステップ特性が観測されることが分かる。そして、その電圧ステップ幅は5.2K観測さ

れたものと変わらず、温度変化のない各温度で同一のSET特性が得られる。このように、Rh-G2デンドリマー分子を用いた素子では、トンネル伝導特性の得られる温度条件ではすべて単電子トンネル特性が得られることが分かった。一般に、SET現象を明確に発現させるには、電子トンネルに伴うエネルギー増加 $e^2/2C$ が熱エネルギー kT 以上である必要がある[11][12]。一般に作成されるSET素子ではCが大きくなるため、この条件が素子動作の温度条件となることが多い。しかし、今回作製した素子では、SET特性による電圧ステップはほぼ50meVであり、トンネル伝導特性の得られる温度範囲を引き上げることができれば、十分に室温動作が可能であることが示唆される。

以上のように、有機単分子Rh-G2デンドリマー分子を中間電極とした素子が明確にSET素子として機能し、その素子ポテンシャルが室温動作も可能な非常に高いものであることが分かった。

2.2.3 有機単分子中間電極 [8][10]

今回作成した素子が、低温において図4のようなSET特性を持つことは明らかであるが、中間電極として導入したRh-G2分子が実際に中間電極として機能しているかを簡単に検討してみる。その一つとして、中間電極として機能している物質のサイズを見積もることが挙げられる。詳細な検討も行っているが[16]、ここでは簡単な近似を行い検証してみる。素子特性に現れる電圧ステップ幅は、先にも述べたとおり、 e/C の大きさを持つ。一方、平板電極上の距離 d の所にある半径 r の導電体の電気容量 C は、 $r \ll d$ の条件の下で、

$$C = \frac{4\pi\epsilon_r\epsilon_0}{(1/r - 1/2d)}$$

で表される。したがって、観測された電圧ステップ幅を ΔV とすると、中間電極の半径 r は、

$$r = 1 / \left(\frac{4\pi\epsilon_r\epsilon_0}{e} \Delta V + \frac{1}{2d} \right)$$

となる。この式に基づき、中間電極と考えているRh-G2分子を球形の導電体と考え、さらにこの式に観測された $\Delta V = 100\text{mV}$ 、 $\epsilon_r = 3$ (ポリイミ

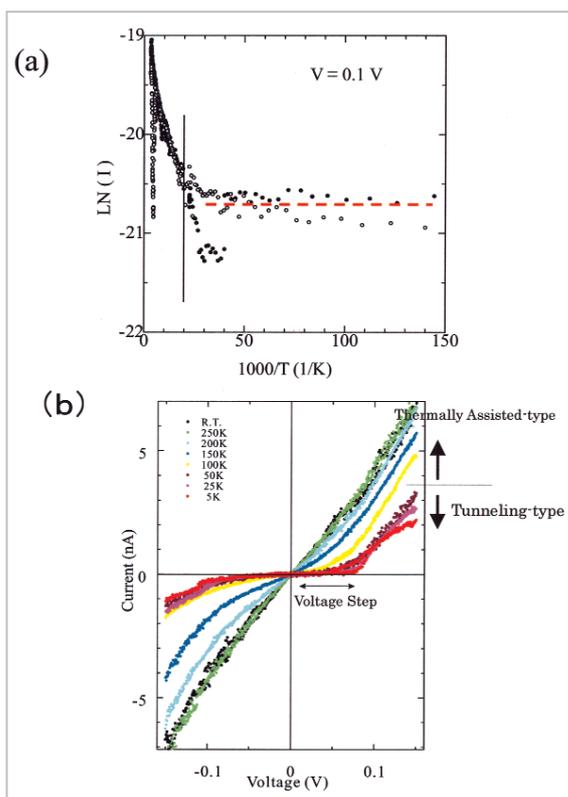


図5 有機単一電子トンネル素子の温度特性
(a) $\ln I - 1/T$ プロット(アレニウスプロット)
(b) $I - V$ 特性の温度依存性

ド)、 $d = 10 \text{ nm}$ (PI25層)を代入すると、中間電極の大きさ r は $r = 3.8 \text{ nm}$ と求められる。実際のRh-G2分子の大きさは、シミュレーション及びLB占有面積等の実験から、約半径1-2 nmと考えられているので、その大きさは幾分小さな値である。この原因として、計算の仮定やRh-G2分子を導電体としたこと、加えて、トンネル層として機能しているポリイミドLB膜の実効的な膜厚が、物理的、電子的に減少していることが挙げられる[17][18]。計算の仮定はあまり成立しなくなるが、Rh-G2分子の大きさから実効的なPIトンネル層の減少分を見積もると、15-20層程度の膜減りが生じていると考えられる。この値は、先の研究結果でも同程度の膜減少が生じていることから、十分考えられる値である。

このように、PI膜厚減少の不確定さは残るが、本素子において、Rh-G2分子は、中間電極として機能していると考えられる。また、ここでは示さないが、図4のような特性はRh-G2分子を導入していない素子ではまったく現れず、単なるトンネル伝導素子として機能していることから明らかである。

3 単一電子トンネル素子の光ゲート効果

先にも述べたが、有機分子、特に色素分子をSET素子の中間電極として用いた場合、有機分子の持つ電子・光機能をSET素子機能に付加することが可能となる。その一つに、光照射による分子機能の付加が挙げられる。例えば、光照射により、色素分子自体の構造が変化する(a)、色素分子から電子が誘起され単電子トンネル現象が変化する可能性(b)や、誘起電荷によりトンネル障壁の変化が生じ、トンネル確率が変化する(c)ことなどである(図6)。これらの現象を応用すれば、有機分子を中間電極に用いることにより、SET素子に新たな光機能を付加することや、単一分子へのアクセスが難しい電子的なゲートに代わり、光によるゲート効果で単一電子の制御が可能となる。加えて、光による多数分子へのアクセスなどを通し、セルフオートマトンや並列処理、ネットワーク処理へ向けた新規アーキテクチャへの展望も開ける。

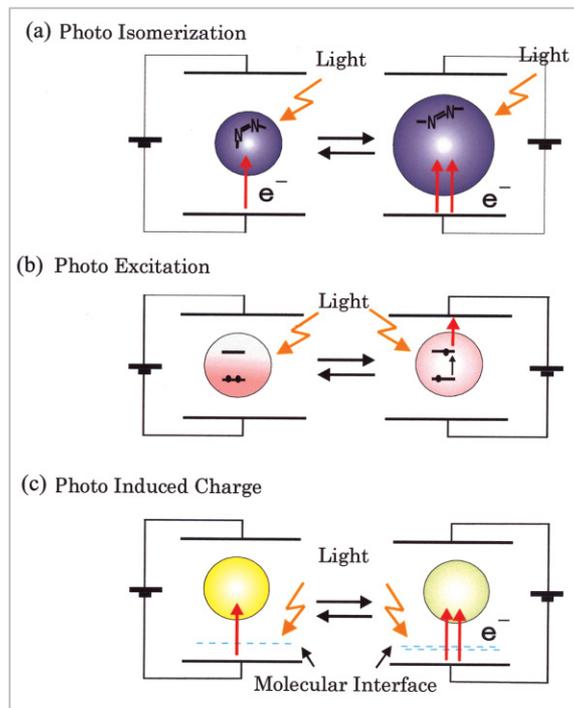


図6 光ゲート型SET素子の概念図

3.1 有機トンネル層SET素子の光照射特性[8]

光照射特性を測定する素子には、下部電極として、光露光、エッチング処理を行った、ITO電極を用い、作成は上記の素子と同様の方法により行った。光照射は、クライオスタット中、一定温度のもとで、ガラス基板側から、ITO電極を通して照射し、光照射時の電気特性を測定した。

今回、基礎的な実験として、まず白色光を、上述した有機トンネル層を有する有機単電子トンネル素子に照射し、その特性変化を観測した。その結果を図7に示す。白色光を照射することにより、単電子特性の変化が観測され、再び暗所に戻すとほぼ元の特性に戻ることが確認された。図を見ると、光照射により、電流値が減少し、トンネル伝導特性が変化しているものの、SET特性の特徴である電圧ステップの位置や幅は変化していない。この事は、この光照射による変化が、中間電極であるRh-G2分子の変化によるものではなく、PIトンネル障壁の変化である事を示唆している。たとえば、光照射による金属/PI界面での電荷授受変化[19]により、トンネル層であるPI分子膜中に引き起こされた帯電特性変化が、このような光特性を生じさせたと考えられる。詳細は検討課題であるが、このような界面

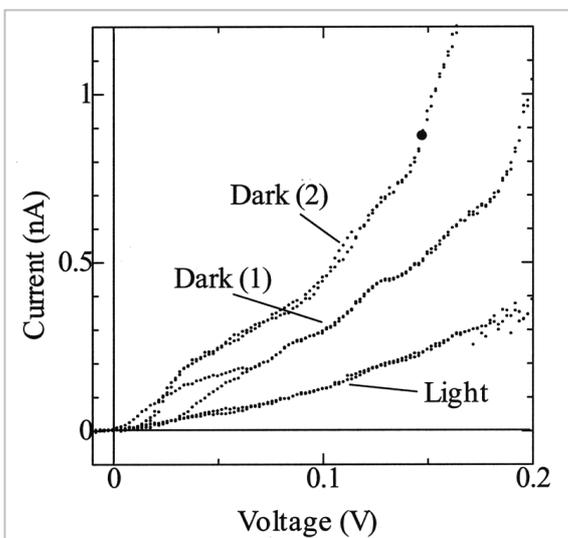


図7 光照射による有機SET素子特性変化—有機トンネル層有機SET素子—

電荷による電位変化が生じたことにより、この電位変化を単電子トンネル特性の制御に用いること(図6(c))の可能性が示唆されたと考えている。

3.2 無機トンネル層SET素子の光照射特性^[20]

有機分子を中間電極とした単一電子トンネル素子の作成には、フレキシブル性や、構造異性化による特性制御性など、一部の新規特性が犠牲となるものの、電子トンネル層として、特に有機分子を用いる必要は無い。代わって、無機材料を用いることにより、その物質安定性や、制御性など、これまで培われたSiテクノロジーの恩恵を受けることができるため、中間電極として用いた有機色素分子による素子特性を明確に評価できる。そこで、有機分子を中間電極とした単一電子トンネル素子の光照射による特性変化を明確に捉えることを目的に、電子トンネル層として、SiO₂を用い、安定的な素子特性の評価を試みた。作成した素子は、上部電子トンネル層を非常に薄く制御性良く作成するため、下部電極として表面が平坦な、高ドーパSi基板を用いた。その上にSiO₂/有機分子/SiO₂層を蒸着し、最後に金電極を蒸着して上部電極とし、素子を形成した^{[20][21]}(図8(a))。光照射は、上部半透明金電極を通して行い、中間電極として用いた色素分子が吸収する単色光などを照射し、クライオスタット中、一定温度のもとで、その

電気特性を測定した。中間電極の有機色素分子としてポルフィリン(POR)系分子を用いた素子の測定結果を図8(b)に示す。中間電極として用いた色素分子の吸収波長の光を照射することにより、単一電子トンネル特性の変化が観測され、再び暗状態に戻すと、元の特性に戻る事が確認された。図を見ると、前節で示した、光照射特性と異なり、光照射により、単電子トンネル特性に特徴的な、電圧ステップの位置、幅の変化が見られる。このことは、前節のトンネル障壁の変化による、トンネル電流値の変化とは異なり、単一電子トンネルの伝導状態が変化したことを意味する。つまり、光を照射することにより、有機SET素子の単電子ブロッケード現象が制御され、SET素子の光によるゲート制御が行われたことを意味する。したがって、この素子に、ある一定電圧を印加し、光照射を繰り返すことにより、光の照射前後において、単電子

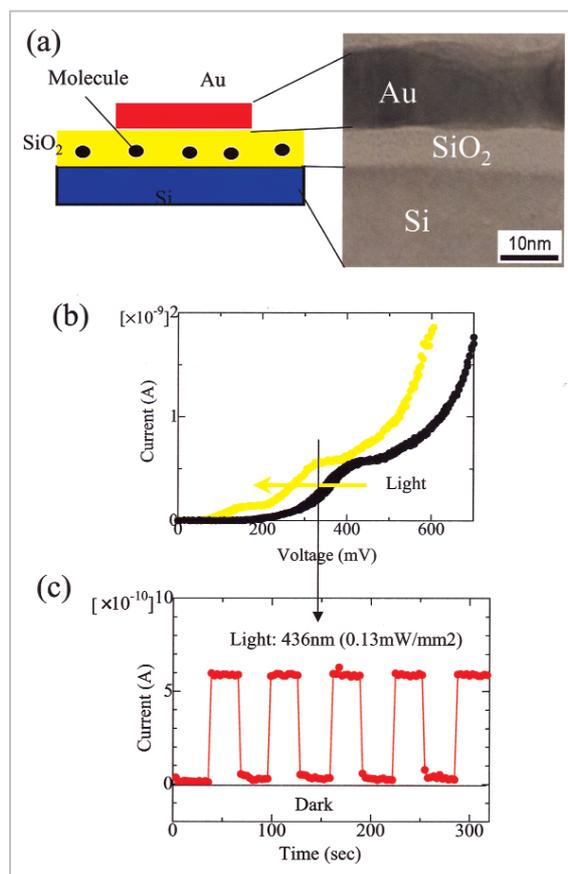


図8 光照射による有機SET素子特性変化—無機トンネル層有機SET素子—
(a)無機トンネル層有機SET素子構造
(b)光照射SET特性
(c)光ゲートスイッチング特性

トンネル条件を変化させることができる。このSETの光によるゲート効果により、SET素子中を流れる電流値のオン/オフが観測される。図8(c)にその結果を示す。以上のように、有機分子中間電極を用いた有機単電子トンネル素子において、光ゲートによるスイッチ現象が観測されたわけだが、その機構の詳細については、検討課題である。ここでは示さないが、照射光波長依存性、強度依存性、スイッチ速度の検討などから、トンネル障壁中への荷電粒子の帯電効果などによる、単電子トンネル素子特性の変化が考えられている[22]。今後、より直接的に有機中間電極を操作する、光ゲート型有機単電子トンネル素子の開発を目指し、現在研究を進めている。

4 単一有機分子エレクトロニクスへ向けた取り組み

前章までに、単一の有機分子の特性に起因する、有機単電子トンネル素子の試作と、その電子・光特性について述べた。その特性は、中間電極となる有機単分子に起因したものであり、有機単分子エレクトロニクスを構築する上で、重要なものである。しかし、今後の有機単分子エレクトロニクス素子をシステム化、集積化していく上で、各有機分子一つ一つに電子的に直接アクセスし、電子・光特性を直接評価することや、有機電子素子を有効に接続していく技術も重要となる。ここでは、それらの研究の中から、本研究室で行われている、超微小ナノギャップ電極の作成と、有機導電性ナノワイヤーの作成について簡単に紹介する。

4.1 微小ナノギャップ電極の作成 [23]

絶縁基板上に孤立した単一の有機分子の電子特性を測定することは、単一有機分子の持つ電子特性を評価する上でも、また今後の分子素子集積化に向けた基礎的な素子特性を評価する上でも、非常に重要な事となる。単一の有機分子に電子的にアクセスすることは、現行の技術では、STMなどのプローブによるものが一般的となる。しかし、絶縁基板上の孤立した単一分子へのアプローチが困難であることや、ゲート電

極の配置など今後の素子化へ向けた回路網への移行等を考えると、数nm程度の大きさの単一分子に直接アクセスできる、ギャップ長数nm以下の、超微小ナノギャップ電極を作成し、単一分子の電子特性を評価することが必要となる。このような微小ナノギャップの作成は、従来の電子ビームなどによるリソグラフ手法では困難であり、様々な手法が検討されている[24][25]。そのなかで、われわれは、定常的に、また再現性良く、ナノメートルレベルのナノギャップ電極を作成するため、収束イオンビーム(FIB)装置を用いた、新規なプロセスを開発し、SiO₂絶縁基板上に、数nm幅のナノギャップAu電極を作成することに成功している[23]。プロセスの詳細はここには示さないが、SiO₂基板上に作成したAuナノギャップ電極のSEM像を図9に示す。ギャップ長5nm程度の良好なAuナノギャップ電極が作成できており、その再現性も高い。現在、このようにして作成したナノギャップ電極間に、前述の色素有機分子や他の機能性分子、材料を導入し、その電子特性を評価している。

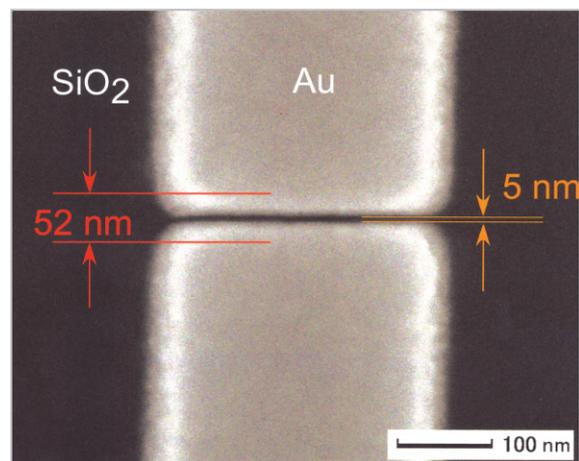


図9 作成したAuナノギャップ電極のSEM像

4.2 ナノサイズ有機導電性ワイヤーの作成 [26]

有機電子素子の集積化を行う上で、素子間の配線を、どのように実現していくかも、重要な問題となる。その1つのアプローチとして、有機導電性ワイヤーの作成と、そのナノサイズ化の研究を行っている。有機分子素子間の配線については、トップダウン型の金属による配線より、素子間に自己組織的な導電性のナノワイヤーを構築していくことが望ましい。そのため、導電

性高分子材料を中心に、様々な分子ワイヤーの研究がなされている[18]。本研究室では、電気化学的手法により、導電性分子結晶のナノワイヤー化を行っている。作成条件により、図10に示すような、数10 nm程度の導電性分子ナノワイヤーの構築に成功している[26]。現在、ナノ領域での導電性の評価、より微細なナノワイヤー化、さらには、素子間配線だけでなく、ナノワイヤー自身への電子機能の埋め込みなどを検討し、研究を進めている。

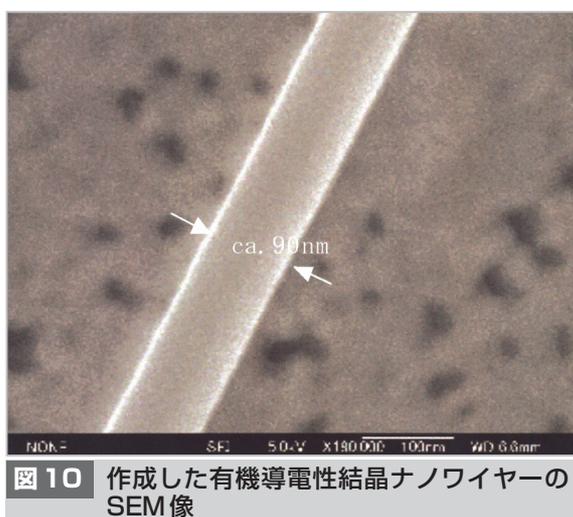


図10 作成した有機導電性結晶ナノワイヤーのSEM像

5 まとめ

有機分子をアクティブ材料として用いる動きは、ここ数年で急激に高まってきている。その

背景には、導電性分子の発見から始まり、液晶ディスプレイの実用化、そして、現在実用化されつつあり、大きな発展を遂げつつあるEL素子の成功がある。そして、今後のエレクトロニクスを展望すると、有機分子をアクティブデバイスとして用いる分子エレクトロニクスは、現在のエレクトロニクスに置き換わるだけでなく、半導体デバイスのロードマップにも分子デバイスが挙げられる[27]など、実現性を帯びた次世代のエレクトロニクスとして発展する可能性がある。さらに、ナノチューブやフラーレン、 dendrimerなどの新しい分子材料が見出され、分子フォトンクス素子、生体機能分子素子とあいまって新機能素子の提案、試作が相次いでいるのが現状である。分子を制御し、分子固有の特異な性質を引き出すことに加え、当然、微小な分子サイズであることから来る量子効果なども含んだ、分子エレクトロニクスということになる。そのような研究には、単分子操作、自己組織化、分子ワイヤー、単一分子整流素子、単一分子発光素子、分子FET、分子トランジスタなど、先駆的な研究がいくつか見られる。本報告で紹介した、有機単一分子を用いたSET素子もそのひとつに挙げられると思う。そして、このように構築された分子素子は、他の研究と相まってシステム化され、今後の情報通信を担う有機分子素子の一翼を形作っていくものと期待される。

参考文献

- 1 A.Aviram and M.A.Ratner, Chem. Phys. Lett. 29, p277 (1974).
- 2 J.Park et al., Nature 417, p722-724 (2002).
- 3 W.Liang et al., Nature 417, p725-729 (2002).
- 4 S.Kubatkin et al., Nature 425, p698-701 (2003).
- 5 Konstantin K. Likharev, Proceedings of the IEEE, Vol,87, p606 (1999).
- 6 K.Yano et al., Proceedings of the IEEE, Vol,87, p633 (1999).
- 7 久保田 徹, 益子 信郎, "第59回応用物理学会学術講演会予稿" 18a-YH-1 (1998).
- 8 久保田 徹 他, "電子情報通信学会技術報告" Vol.99, No.292, OME99-69 p31-36 (1999).
- 9 T.Kubota et al., "Proceedings of LB9 Conference", Potsdam, p177 (2000).
- 10 T.kubota et al., Thin Solid Films, 393, p379-382 (2001).
- 11 春山 純志, "単一電子トンネリング概論", コロナ社 (2002).
- 12 Janos H.Fendler, "Nanoparticles and Nanostructured Films", WILEY-VCH, Weinheim, Chap.15.

- 13 M.Iwamoto, T.Kubota, and M.Sekine, J.Phys.D 23, p575 (1990).
- 14 M.Kakimoto et al., Chem.Lett., p823-826 (1986).
- 15 S.Yokoyama, T.Nakahama, A.Otomo, and S.Mashiko, Chem. Lett., p1137 (1997).
- 16 Y.Noguch, et al., IEICE Trans. Electron., E85-C, 1247 (2002).
- 17 T.kubota et al., Thin Solid Films, 210/21, p277 (1992).
- 18 E.Itoh and M.Iwamoto, Appl.Phys.Lett. 68, 2734 (1996).
- 19 E.Itoh, Y.Niwa, and M.Iwamoto, Thin Solid Films 284, 545 (1996).
- 20 Y.Wakayama et al., Appl.Phys.Lett. Vol.85, No.2, p329 (2004).
- 21 Y.Wakayama et al., J.Appl.Phys. Vol.94, No.7, p4711 (2003).
- 22 Y.Noguchi et al., in preparation.
- 23 T.Nagase et al., Thin Solid Films 438/439, p374 (2003).
- 24 H.Park et al., Appl.Phys.Lett. Vol.75, p301 (1999).
- 25 A.F.Morpurgo et al., Appl.Phys.Lett. Vol.75, p2084 (1999).
- 26 H.Hasegawa et al., Thin Solid Films 438/439, p352 (2003).
- 27 国際ロードマップ ITRS 2001 : <http://public.itrs.net>



久保田 徹

基礎先端部門関西先端研究センター
ノ機構グループ主任研究員 工学博士
有機分子エレクトロニクス



永瀬 隆

基礎先端部門関西先端研究センター
ノ機構グループ専攻研究員 博士(工
学)
有機分子エレクトロニクス



長谷川裕之

基礎先端部門関西先端研究センター
ノ機構グループ主任研究員 博士(理
学)
物性化学



益子信郎

基礎先端部門関西先端研究センター長
工学博士
光計測、レーザー光学、分光計測、ナ
ノテクノロジー