

平成22年 5月14日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2007～2009

課題番号：19310079

研究課題名（和文） カーボンナノチューブ電極による単分子電子素子の研究

研究課題名（英文） Studies of Single Molecular Electronic Devices Using Carbon Nanotube Electrodes

研究代表者

小川 琢治 (OGAWA TAKUJI)

大阪大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：80169185

研究成果の概要（和文）：究極の電子素子として一つの分子が電子部品として機能する素子の研究を行った。その研究により次の結果を得た。1. 必要な機能を持つ分子を全自動合成装置で合成するための基本反応の開発に成功した。2. 分子を結合するための分子レベルの幅を持った電極を種々の金属を用いて作成する新規手法の開発に成功した。3. 分子を結合する手法として金ナノロッドを用いた素子開発に成功した。4. 単一分子からなるダイオードとしては、世界最高の整流比を持つものの作成に成功した。

研究成果の概要（英文）：We studied molecular electronic devices in which each molecules work as an electronic parts. 1. We succeeded to develop a new synthetic method by which required molecules can be synthesized by an automatic machine. 2. We succeeded to develop a new method to fabricate molecular scale gap electrodes with various metals. 3. We succeeded to develop a new fabrication method of molecular scale electronic devices using gold nano-rods. 4. We succeeded to fabricate single molecular diodes with world highest rectifying ratio.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	5,100,000	1,530,000	6,630,000
2008年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
2009年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
総計	14,900,000	4,470,000	19,370,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学、ナノ材料・ナノバイオサイエンス

キーワード：ナノ材料創製、分子デバイス

## 1. 研究開始当初の背景

**単分子電導計測の重要性**

有機化合物が絶縁体だけではないことは、1950年代の赤松、井口らによりペリレン・臭素錯体の発見により初めて明らかになった。その後、白川らのポリアセチレンの研究や、斉藤らによる有機超伝導体の研究が日本において大きく発展した。こうした有機電導

体はすべて多くの分子が集まってできるバンド構造によりその物性が決まってくる。そうしたバンド構造を作らない単分子～小数分子における有機分子の電気特性は、未だに開拓途上の科学・技術上の重要課題である。

**単分子電導計測の研究動向**

1974年のAviramらによる単分子整流器の提案以来、単分子電子素子は長らく科学分野

のチャレンジングなテーマであった。2000年頃から単分子の電気特性計測の論文がNature, Science誌などを賑わせたが、いくつかの測定は本当に目的分子の電気特性を測定しているのかどうか疑われる状況であった。2009年の時点においては、金などの細線を目的分子の溶液の中に入れて、ピエゾ素子で引きちぎりながら電気特性を測定するブレイクジャンクション法がもっとも信頼できる単分子計測法として認められてきており、この方法を使って種々の分子の電気特性が計測されている。

多くの理論的研究も報告されており、いくつかの予測において有機分子は共鳴トンネルにより透過確率が1近くになり、量子化コンダクタンス  $G_0 (=2e^2/h)$  に近い値を示すはずであるとされていた。しかし、上記の break junction による実験によるとほとんどの分子において  $10^{-3} \sim 10^{-4} G_0$  と小さな値を示す。それが単分子電導における本質なのか、分子と電極の接合面における散乱なのかはまだ明らかになっていない。また、こうした理論計算においては、電子は波動として扱われているが、実際の実験系においては電子が古典的な荷電粒子として振る舞う現象も多く見られ、電子の波動性と粒子性を同時に扱うことができる動的な（時間依存の）理論体系も求められる。

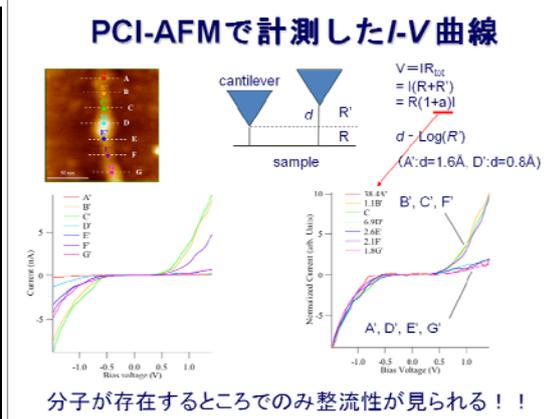
#### 応募者のこれまでの研究

応募者は、これまで有機分子の構造と単分子～少数分子における電気・光特性の関連を実験的に明らかにすることを目指した研究を行ってきた。それにより、結晶構造に依存することなく、分子設計をそのまま物性に反映させ、さらにそれらを集積化することで高度の機能を実現することが最終的な目標である。

単分子～少数分子の電気特性を計測する独自手法の開発のために、これまで次のような研究を行ってきた。

(1) 金ナノ粒子・有機ジチオール・金電極を用いた電気特性の計測：マイクロメートル程度のギャップを持つ金電極上で、金ナノ粒子と有機ジチオールの溶液を混合すると、金電極同士を金ナノ粒子と有機ジチオールの複合体がつなげることを世界で初めて発見した。この手法は、さまざまな有機ジチオールにおいて適用することが可能で、世界中の様々な研究者が利用しており、有機分子の特性を生かした電子素子を作成する一つの標準手法と認知されている。また、金ナノ粒子・有機分子複合体において、幅広く光応答電流が見られることを見出した。

(2) 有機分子の自己組織化を利用した数～数十ナノメートルレベルのナノギャップ電極の開発：この手法を用いて作成したナノギャップ電極を用いて、単電子トランジス



分子が存在するところのみ整流性が見られる！！

図1. カーボンナノチューブ上にポルフィリン分子が吸着した複合体の  $I-V$  特性を各箇所測定した結果を画像化した。ポルフィリン分子が存在する所でのみ整流性が見られる。

ター、光アシスト原子スイッチをはじめとする、さまざまなナノデバイスを作成した。

(3) カーボンナノチューブ・有機分子複合体を独自の走査プローブ顕微鏡を用いて電気特性を計測し、分子が存在している場所でのみ整流性が現れることを明らかにした。また同様の手法を用いてカーボンナノチューブの物性が表面に吸着する物質により大きく変わることも明らかにした(図1)。

これまでの研究において用いた分子の構造は、比較的単純な共役π電子系がつながったものであり、多くの場合対照的な構造をもつものであった。そのため、観測された機能としては、光スイッチや整流性などの比較的単純なものである。これを発展させて、さらに高機能が期待できる複雑な分子を合成し、これらの計測系に導入することで、高機能分子電子素子の実証を行いたいと考えるに至った。

#### 2. 研究の目的

(1) 整流、光起電力、増幅、メモリー効果、スイッチング等の機能を単分子～少数分子で持つと期待できる分子を設計、合成する。

(2) それらの電気物性を、既存のブレイクジャンクション法や、われわれ独自の二探針原子間力顕微鏡・カーボンナノチューブの手法などで計測する。

(3) 一つの分子にカーボンナノチューブを三本結合し、三端子単分子素子を実現する。

(4) 機能が確認された分子系を電極に組み込み、素子化の実験を行う。

これらの実験により、将来の単分子電子集積回路のための基礎的な知見を得ることを目的とする。

#### 3. 研究の方法

##### 分子の設計と合成

この研究のもっとも重要な点は、期待する機能を実現するための分子設計にかかって

いる。

- (1) 整流、光起電力を期待できる分子系
- (2) 増幅機能を持つと期待できる分子系
- (3) メモリー効果、スイッチング効果を持つと期待できる分子系

#### カーボンナノチューブへの結合と独自走査プローブ顕微鏡による計測

末端がアミノ基の分子は、末端がカルボキシル化されたカーボンナノチューブに脱水縮合反応を利用して結合させる。このようにして作成したカーボンナノチューブ・有機分子・カーボンナノチューブは、絶縁体上に分散させ、片方に電極を蒸着して PCI-AFM を用いるか、2 探針電導性原子間力顕微鏡でその電気物性を計測する。(図 2)

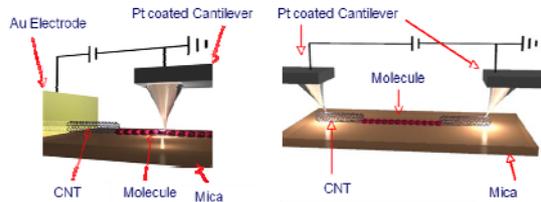


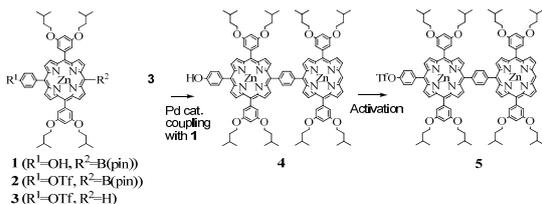
図 2. カーボンナノチューブ・有機分子・カーボンナノチューブの電気特性の計測方法。(左) カーボンナノチューブの片端に電極を蒸着し既存の PCI-AFM を用いて計測する。

#### 4. 研究成果

(1) ポルフィリンアレイ全自動合成のための反応の開発：

単分子で様々な電子機能を持つ分子を効率的に合成するために、それらの分子を全自動合成装置で合成するための、基本反応の開発を行った。

ポルフィリンアレイは、光合成反応中心モデル、電気・光機能性分子、単分子ワイヤーとして多くの興味を引き、様々な手法で合成が行われてきた。段階的手法による合成では、大きく複雑なアレイの合成は非常に時間と労力がかかる。同じポルフィリンユニットを倍々に増やす方法で 1000 量体まで合成された例があるが、この手法で異なるユニット分子を導入することは困難である。われわれは、固体表面上での自己組織化を利用した情報処理や、非線形応答をする単一分子電子素子の複合化による情報処理という創発機能の



スキーム 1. ポルフィリンアレイ全自動合成の基本反応スキーム

実現を目指した研究を行っているが、これらにおいて複雑で大きなポルフィリンアレイが必要となってくる。そのために、DNA 合成のように出発原料さえ用意しておけば、結合の仕方を指示するだけで目的の分子が自動的に合成できるシステムを目指した。

これを実現化するための基本反応として、Suzuki カップリングを想定した。スキーム 1 のように連続した Suzuki カップリングを行う。まず、フェノール基とボロン酸を持つポルフィリン 1 と、1 の末端ボロン酸がない構造の 3 をカップリングさせる。生じた 4 のフェノール末端をトリフラート化し、5 とする。5 のトリフラート末端と 1 をカップリングさせる。このような反応を連続的に繰り返すことで、種々のポルフィリンアレイを簡単に合成できるうえ、同様の反応の単純な繰り返しであるので、全自動化に適していると考えている。

(2) ナノギャップ電極による有機分子の非線形特性

単分子～少数分子において、スイッチやメモリー効果を持つ分子を効率的に探索するために、ナノギャップ電極を用いた評価システムを構築した。

われわれは従来の分子定規法と傾斜蒸着法を組み合わせる分子定規傾斜蒸着法という手法を開発した(図 4 左)。この方法は金属蒸着の際の傾斜角度によってギャップ幅を変える事ができる上、拡散性の金属材料でも最後に分子定規を除去するため親構造と子構造が容易に分離出来、ギャップがショートする可能性を押さえることができるというメリットがある。この方法で作成した Co-Co ナノ電極の SEM 像を図 4 (右) に示した。

この手法を用いて次のナノデバイスを作成し、物性を研究した。(1) Au-Pt ナノギャップ電極に有機錯体分子を蒸着したデバイスにおいては、高バイアス領域にヒステリシスが観測された。(2) Co-Co ナノギャップ電極において、閾値特性を示す  $I-V$  が観測された(図 5)。(3) Co-Co ナノギャップ電極にグラフェン-有機分子複合体を乗せたデバイスにおいては、興味深い磁場依存性が観測された。(4) Cu-Cu ナノギャップ電極を用いると、Cu による原子スイッチが作成でき、可逆的なスイッチング現象が観測できた。これ以外に

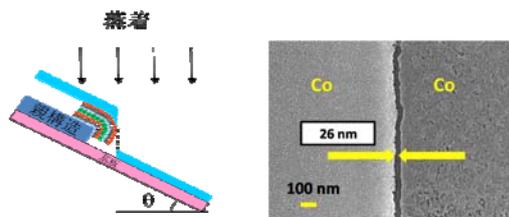


図 4. 分子定規傾斜蒸着法の概念図(左)と、作製した Co-Co 対向ナノギャップ電極の SEM 像

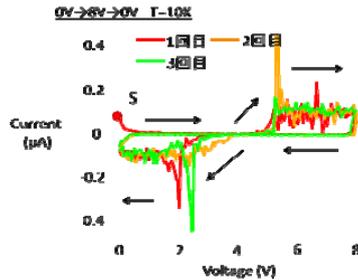


図5. Co-Co 電極において観測された電流・電圧特性

も、この手法を用いると超伝導ナノギャップ電極の作成なども可能になり、ナノ科学研究に大きなインパクトを与えると考えている。

### (3) 金ナノロッドを用いた単一・少数分子の電気物性測定

共同効果によらない単一（もしくは少数）の分子の電気特性を研究し、それらを合目的に組み合わせることでより高次の機能をもたせることを目指している。その目的で種々の分子を合成しているが、それらの分子を容易に素子化して電気特性を計測する手法を確立する必要がある。その一手法として、金属ナノロッドを用いる方法を検討した。金のナノロッドは、末端部分に(111)面が出ており、ここにチオールが選択的に吸着しやすい。そのため金ナノロッドと化合物1を混合すると金ナノロッドの両端に有機ジチオールが吸着して、さらにそのチオール基が他の金ナノロッドとも吸着するため図6に示すように1次元的につながった構造ができる。これに金を蒸着してSPMにより分子の電気物性を測定した。その結果、この手法で単分子電気伝導特性を計測することが可能であることがわかった。この方法は、実働素子への発展が容易であるため非常に重要な結果である。

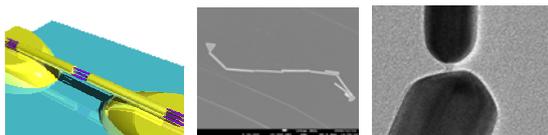


図6. 金ナノロッドと有機分子からなる複合体素子の概念図(上)、金ナノロッドと有機分子複合体のSEM像(下左)とTEM像(下右)。

### (4) カーボンナノチューブに結合したポルフィリン-イミド単分子ダイオードの合成

単分子ダイオードは、1974年のAviramとRatnerによる提案以来、多くの研究者が挑戦してきた。しかし、理論的、実験的に種々の異論があり混沌とした状況にあった。昨年、ブレイクジャンクションを用いた非対称分子の測定でI-Vが非対称になることが見いだされ、単分子ダイオードが確かに可能であることが明らかになった。

図7に示すようにドナー部としてポルフィ

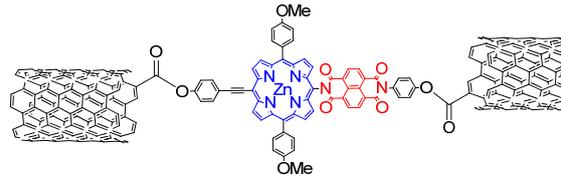


図7. 単層カーボンナノチューブ・ポルフィリン・イミド・単層カーボンナノチューブ複合体の構造

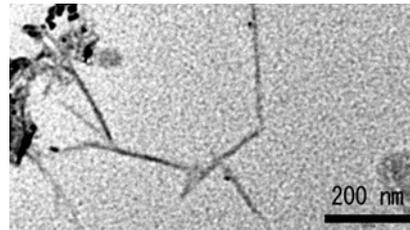


図8. 分子1をSWNT-COOHと脱水縮合させて得られた複合体のTEM画像。

リンをアクセプター部としてイミドを持ち、それらの両端に結合部としてヒドロキシル基を持つ分子合成を行った。ドナーとアクセプターがつながっていると、シリコン半導体におけるpn接合同様に、単分子において整流性や光起電力などの機能が現れると期待できる。

末端をカルボキシル化したカーボンナノチューブ(SWNT-COOH)と分子の両末端部におけるヒドロキシル基を脱水縮合させたところ図8に示すように、SWNTが分子で架橋していると思われるTEM画像が得られた。この複合体をPCI-AFMを用いて計測したところ、整流比が300~500と非常に大きな値の整流性が見られることがわかった。これまでに報告されている単分子ダイオードの整流比はせいぜい3程度であり、二桁大きな値が得られた。このことは、単分子ダイオードの実用的な可能性を示唆するものであると同時に、次のトランジスターや高機能電子部品への展開が可能であることを示すものであり、非常に重要な成果である。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計16件)

査読有り

(1) Spectral and structural studies of a new oxalato-bridged dinuclear copper(II) complex having two 3-(thiophen-2-yl)-1,10-phenanthroline ligands in a trans configuration, Wei Huang and Takuji Ogawa, *Inorganic Chimica Acta*, **362**, 3877-3880 (2009).

(2) A photo-responsive molecular wire composed of a porphyrin polymer and a fullerene derivative, Hiroaki Ozawa,

Kawao Masahiro, Hirofumi Tanaka and Takuji Ogawa, *Journal of Materials Chemistry*, **19**, 8307-8313 (2009).

(3) Preparation of long conjugated porphyrin polymers with gold nanoparticles at both ends as electronic and/or photonic molecular wires, Hiroaki Ozawa, Masahiro Kawao, Hirofumi Tanaka and Takuji Ogawa, *Chem. Lett.*, **38**, 542-543 (2009).

(4) Spectral, structural, and computational studies of a new family of ruthenium(II) complexes containing substituted 1,10-phenanthroline ligands and in situ electropolymerization of a phenanthroline-ruthenium(II) complex bridging nanogap gold electrodes, Wei Huang, Li Wang, Hirofumi Tanaka, and Takuji Ogawa, *Eur. J. Inorg. Chem.*, 1321-1330 (2009)

(5) Vertical alignment of single-walled carbon nanotube films formed by electrophoretic deposition, Sung-Kyoung Kim, Haiwon Lee, Hirofumi Tanaka, and Paul S. Weiss, *Langmuir*, **24**, 12936-12942 (2008).

(6) Effects of metal-ion complexation for the self-assembled nanocomposite films composed of gold nanoparticles and 3,8-bis(terthiophenyl)phenanthroline-based dithiols bridging 1 micro meter gap gold electrodes: Morphology, temperature dependent electronic conduction, and photoresponse, Wei Huang, Hirofumi Tanaka, and Takuji Ogawa, *J. Phys. Chem. C*, **112**, 11513-11526 (2008).

(7) Syntheses, crystal structures and spectral properties of a series of 3,8-bisphenyl-1,10-phenanthroline derivatives: precursors of 3,8-bis(4-mercaptophenyl)-1,10-phenanthroline and its ruthenium(II) complex for preparing nanocomposite junctions with gold nanoparticles between 1  $\mu\text{m}$  gap gold electrodes Wei Huang, Gou Masuda, Seisuke Maeda, Hirofumi Tanaka, Takami Hino and Takuji Ogawa, *Inorg. Chem.*, **47**, 468-480 (2008).

(8) A new utilization of organic molecules for nanofabrication using the molecular ruler method, Takami Hino, Hirofumi Tanaka, Hiroaki Ozawa, Yuko Iida, and Takuji Ogawa, *Colloids and Surfaces A*, **313-314**, 369-372 (2008).

(9) Scanning tunneling microscopy investigation of vanadyl and cobalt(II) octaethylporphyrin self-assembled monolayer arrays on graphite, Yusuke Miyake, Hirofumi Tanaka, and Takuji Ogawa, *Colloids and Surfaces A*, **313-314**, 230-233 (2008).

(10) Different I-V characteristic of single electron tunneling induced by using double-barrier tunneling junctions with differing symmetric structures, R. Negishi, T. Hasegawa, K. Terabe, and M. Aono, H. Tanaka, H. Ozawa, and T. Ogawa, *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 223112 (3pp) (2007).

(11) Photo responsibility of Au nano-particle / porphyrin polymer composite device using nano-gap electrodes, Takuji Ogawa, Hiroaki Ozawa, Masahiro Kawao, Hirofumi Tanaka, *J. Mater. Sci: Mater Electron*, **18**, 939-942 (2007).

(12) Synthesis of dendron protected porphyrin wires and preparation of a one-dimensional assembly of gold nanoparticles chemically linked to the  $\pi$ -conjugated, wires, Hiroaki Ozawa, Masahiro Kawao, Hirofumi Tanaka, and Takuji Ogawa, *Langmuir*, **23**, 6365-6371 (2007).

(13) Metal-semiconductor transition-induced visible fluorescence in singlewalled carbonnanotube / noble-metal-nanoparticle composites, Subramaniam Chandramouli, Sreepasad T.S., Pradeep T., Pavan Kumar G.V., Narayana Chandrabhas, Yajima T., Sugawara Y., Tanaka Hirofumi, Ogawa Takuji, Chakrabarti J., *Phys. Rev. Lett.*, **99**, 167404(4), (2007).

(14) Construction of macrocycle-based molecular stairs having pendant 4-aminopyridine, 4-dimethylaminopyridine and isonicotinonitrile groups, Wei Huang, Zhaolian Chu, Shaohua Gou, and Takuji Ogawa, *Polyhedron*, **26**, 1483-1492 (2007).

(15) Refinement of Conditions of Point-Contact Current Imaging Atomic Force Microscopy for Molecular-Scale Conduction Measurements, Takashi Yajima, Hirofumi Tanaka, Takuya Matsumoto, Yoichi Otsuka, Yoshitaka Sugawara and Takuji Ogawa, *Nanotechnology*, **18**, 095501 (5pp) (2007).

査読無し

(1) 田中啓文, 小川琢治「ナノ構造の電気伝導直接測定」機能材料 査読無 5月号 2009 pp41-49

[学会発表] (計 22 件)

(1) 野坂長範・小川琢治, ポルフィリンアレイ全自動合成のための反応の開発, 日本化学会第 9 4 春季年会, 2010/3/28, 近畿大学.

(2) 田島康太郎・田中啓文・日野貴美・李舜里・小川琢治, ナノギャップ電極による有機分子の非線形特性, 日本化学会第 9 4 春季年会, 2010/3/28, 近畿大学.

(3) 十時悠誌, 田中啓文・日野貴美・小川琢治, 金ナノロッドを用いた単一・少数分子の電気物性測定, 日本化学会第 9 4 春季年会, 2010/3/28, 近畿大学.

(4) 郷田 隼・後藤 章文・田中啓文・小川琢治, カーボンナノチューブに結合したポルフィリン-イミド単分子ダイオードの合成, 日本化学会第 9 4 春季年会, 2010/3/28, 近畿大学.

(5) 大高美紗, 三宅雄介, 田中啓文, 小川琢治, 大田昌弘, HOPG 固液界面におけるジイミド分子二次元構造の STM および FM-AFM

による研究、日本化学会第94春季年会、2010/3/28、近畿大学。

(6) 小川琢治、単一分子エレクトロニクス分子設計と機能戦略、国際高等研シンポジウム、2009/12/12、国際高等研究所・京都。

(7) 小川琢治、創発による表面ナノ分子システムの新展開、表面科学シンポジウム、2009/10/27、タワーホール船橋、東京。

(8) H. Tanaka T. Hino K. Tajima T. Hasegawa Y. Ito M. Aono and T. Ogawa, Fabrication of Copper Nanogap Electrode by Molecular Ruler Method for Atomic Switch Devices, 10th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures, 2009/9/25, Granada, Spain.

(9) Takami Hino, Hirofumi Tanaka, Tsuyoshi Hasegawa, Yusuke Miyake, Masakazu Aono, Takuji Ogawa, Fabrication and Measurement of Photo-Responsive Atomic Switch, 10th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures, 2009/9/23, Granada, Spain.

(10) 田中啓文、日野 貴美、長谷川 剛、伊藤弥生美、青野正和、小川琢治、光機能センサー素子への応用、応用物理学会秋季講演会、シンポジウム：金属酸化物系材料の新展開-メカニズムの解明からデバイス応用まで、2009/9/10、富山大。

(11) 田中啓文、長谷川 剛、田島 康太郎、李 薜里、日野 貴美、小川琢治、分子定規法を用いて作製したナノギャップ電極を用いた分子電子素子、応用物理学会秋季講演会、シンポジウム：ナノギャップの作製とそのデバイス応用-ナノギャップを用いたナノエレクトロニクスデバイスに向けて、2009/9/9、富山大。

(12) Takuji Ogawa, Hirofumi Tanaka, Takami Hino, Kohtaro Tajima, Syun Gohda, Yuji Totoki, Takenori Nosaka, Fusa Ohtaka, Toward Stochastic Resonant Molecular Electronic Device, The 4th Taiwan-Japan Bilateral Symposium on Architecture of Functional Organic Molecules, 2009/8/18, 福岡/Hyatt Regency.

(13) H. Tanaka T. Hino, K. Tajima T. Hasegawa T. Ebihara, Y. Ito, M. Aono, and T. Ogawa "Nanogap Electrode of Copper Fabricated by Molecular Ruler Method toward Commercially Available Atomic Switch Devices", AsiaNANO2008, 2008/11/7, Singapore.

(14) H. Ozawa, M. Kawao, S. Uno, H. Tanaka, K. Nakazato, T. Ogawa "Preparation of self-assembly architectures

fabricated from porphyrin derivatives", AsiaNANO2008, 2008/11/7, Singapore.

(15) T. Hino, H. Tanaka, T. Hasegawa Y. Miyake, T. Ebihara, M. Aono, T. Ogawa "Fabrication and Measurement of Photo-Responsive Atomic Switch", AsiaNANO2008, 2008/11/7, Singapore.

(16) Takuji Ogawa, "Construction of Nano-Structures from Conductive Nano-Materials with Functional Molecules for Molecular Electronics", Annual Meeting of Brazilian Chemical Society, 2008/5/27, Aguas de Lindoia, Brazil.

(17) 小川琢治、「分子エレクトロニクスのための有機分子/無機ナノ構造体の固体表面上での自己組織化」、依頼講演、第56回高分子討論会、2007/9/19、名古屋工業大学、名古屋市

(18) 小川琢治、「分子エレクトロニクスのための有機分子・無機ナノ構造体の自己組織化」、招待講演、第68回応用物理学会学術講演会シンポジウム 2007/9/5、北海道工業大学、札幌市

(19) 小川琢治、「分子エレクトロニクス実現に向けての有機分子・無機ナノ構造体の自己組織化とナノスケール電気特性の計測」、依頼講演、第4回鈴木シンポジウム 2007/9/2、愛媛大学、松山市。

(20) Hirofumi Tanaka, Takashi Yajima, Takuya Matsumoto and Takuji Ogawa, "Condition refinement of point-contact current imaging atomic force microscopy for molecular-scale measurement", International Scanning Probe Microscopy Conference, 2007/6/11-14, Jeju, Korea.

(21) Yusuke Miyake, Takashi Yajima, Hirofumi Tanaka and Takuji Ogawa "Alkyl chain length dependence on the two-dimensional structure and STS studies of naphthalene-diimide N-alkyl derivatives on HOPG", International Scanning Probe Microscopy Conference, 2007/6/11-14, Jeju, Korea.

(22) 小川琢治、「有機分子・無機ナノ構造複合体の作製と物性計測」招待講演、九州大学大学院工学研究科特別講演会2007/5/21、九州大学。

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小川 琢治 (OGAWA TAKUJI)

大阪大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号：80169185

### (2) 研究分担者

田中 啓文 (TANAKA HIROFUMI)

大阪大学・大学院理学研究科・助教  
研究者番号：90373191