

令和 3 年 5 月 4 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01807

研究課題名(和文) 表面合成法を駆使した機能性ナノリボン分子の創成

研究課題名(英文) Fabrication of functional nanoribbons via on-surface synthesis

研究代表者

塩足 亮隼 (Shiotari, Akitoshi)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・助教

研究者番号：50755717

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、従来に無いナノスケールの分子ポリマーを基板上に作製し、その基板上で狙った機能を発現させ、単分子レベルで観測・制御することを目的とした。金基板上に2種の有機分子を共吸着(ヘテロアッセンブリー)させて加熱することで新規のリボン分子を合成し、その構造と機能を評価した。生成物として、末端が立体的に突き出たグラフェンナノリボンを得た。その末端はスプリングワッシャー型の炭素骨格であり、そこに原子間力顕微鏡の探針を接近させることで、ねじれた骨格の構造反転を誘起することができた。これにより、生成物が局所的な機械刺激によって駆動する単分子スイッチとして機能することが実証され、当初の目的を達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、新しいアプローチの合成スキームによって、単分子スイッチとして機能するリボン分子の作製・構造決定・機能評価を実現した。それに加えて、その研究過程で、表面合成法によってグラフェンナノリボンを得るための合成パラメータ制御を系統的に行い、より高品質な生成物を得るための条件を見出している。このような本研究の表面合成および機能評価スキームで得られた知見を、従来の有機化学合成法による原料分子の設計と組み合わせることで、より複雑な機能を発現する分子の創成が可能になり、単分子デバイスや分子マシンの実用的研究が進展すると期待される。

研究成果の概要(英文)：In this study, a novel nanocarbon material was fabricated by the on-surface synthesis method with two kinds of precursors (heteroassembly) on a gold surface. The atomic structure of the product was identified by high-spatial resolution atomic force microscopy (AFM), and it was demonstrated that the nanoribbon works as a single-molecule mechanical switch. The ribbon terminal has a spring-washer-like carbon framework, and can be flipped by a mechanical stimuli from an AFM tip in a selective and reversible manner.

研究分野：表面科学

キーワード：炭素材料 グラフェンナノリボン 表面合成 分子スイッチ 原子間力顕微鏡

1. 研究開始当初の背景

単一の分子に機械部品や電子部品のような機能を持たせて働かせることは、合成化学における究極のゴールの一つであり、そのような機能的な分子は半導体材料に代わる極小デバイス素子としての応用が期待されている。分子の構造や機能が、分子を固定するための基板や、隣接する同一あるいは異種の分子の存在下に置いてどのように影響を受けるかを評価することは、分子デバイス・分子マシンの実現のために不可欠な過程である。完全に孤立した分子と異なり、基板に吸着した有機分子は基板との相互作用によって立体構造が変化し、その物性(電子状態、振動状態、スピン状態など)が変調しうる。また、基板上的隣接分子間との相互作用やそれによる自己組織化による物性の変調も起こりうる。このような相互作用の影響を考慮・制御することが、分子の機能をうまく発現させるうえで重要である。

「表面合成法」は、そのような金属基板による影響を積極的に利用して有機分子から新規炭素材料を得るための手法である。これは、原料となる有機分子(前駆体)を原子レベルで平坦な金属表面に吸着させて加熱することで、その表面の触媒作用によって目的の分子構造体を作製する手法である。国内外の多くの研究グループがこの手法を用いて様々な形状のグラフェンナノリボン(GNR)やナノグラフェンなどの新規なナノスケール炭素材料の創成に成功している。その一方で、反応過程において基板上で分子がラジカル化することに起因して、多種の欠陥構造や副生成物が形成されるという問題点が指摘されていた。そのため、狙い通りの物性・機能を有するナノカーボン材料を、高収率で合成する手法の確立が望まれていた。また、表面合成法で生成した材料物質の単分子レベルでの機能評価については未だ研究例が少なく、生成物の機能を単分子レベルで計測・制御する手法の確立が望まれていた。

2. 研究の目的

本研究では、従来にないナノスケールの分子ポリマーを基板上に作製し、その基板上で狙った機能を発現させ、単分子レベルで観測・制御することを目的とした。具体的には下記のことを明らかにすることを狙った。

- (1) 原子数や化学組成が規定された新種のナノリボン分子を高収率で生成するための新しい表面合成法を探索し、その反応スキームを明らかにする。
- (2) 作製したナノリボン分子の機能(たとえば、リボンのたわみによる機械的振動特性など)を評価する。
- (3) 機能的なナノリボン分子の表面吸着構造を単分子レベルで同定し、構造と物性の相関を徹底的に解明する。

3. 研究の方法

機能性ナノリボン分子を得るために、ハロゲン基の数が異なる2種のハロゲン化アリール分子を前駆体として共吸着させて金属基板上で加熱する手法「ラジカルキャッピング法」を考案した。リボン本体を形成する前駆体分子として、10,10'-dibromo-9,9'-bianthracene (DBBA)を用いた(図1左)。これをAu(111)表面に吸着させて400℃程度に加熱することにより、炭素数7の幅を有するアームチェア型GNR(7-AGNR)が形成することが知られている(図1右)。DBBAは2つのプロモ基を有しており、金属表面上での加熱によってプロモ基が脱離してバイラジカルとなり、その後、重合(図1中央)、脱水素環化が起こる。DBBAの他に、プロモ基を1つのみ有するハロゲン化アリール(以降、末端前駆体と呼ぶ)を共吸着させ、脱ハロゲン化させることによって、DBBA由来のラジカルポリマー末端に結合させ、GNRの末端に機能を持たせることを試みた。測定には、非接触式原子間力顕微鏡(ncAFM)と走査トンネル顕微鏡(STM)による同時観察が可能な顕微鏡装置を用いた。超高真空・低温環境におけるncAFMを用いることで、GNRを含めた有機分子・カーボン材料の内部構造(炭素骨格)が可視化されることが知られており、その極めて高い空間分解能によって生成物の構造評価を行った。

4. 研究成果

(1) 新規ナノリボン分子のための材料分子の探索

まず、末端前駆体となりうる複数種のハロゲン化アリールについて、DBBAとのヘテロアクセスンブリーによる新ポリマー分子の合成を試みた。末端前駆体の分子量が小さい場合は、表面からの分子脱離が優先的に起こり、目的の生成物が得られなかった。そこで、比較的大きな分子量のハロゲン化アリールを末端前駆体として選択したところ、DBBAのみから生成される7-AGNRとは明らかに異なる構造体が形成

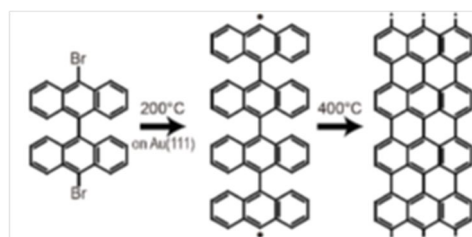


図1: DBBAを前駆体として用いたAu(111)表面上の7-AGNRの合成スキーム。

されることを見出した。しかし、この新しい末端構造を有する GNR は数が非常に少なく、機能を調べるために十分な個数が見つからなかった。さらに、DBBA 由来の通常の GNR にも欠陥や副生成物が多くみられ、末端前駆体由来の構造体との識別が困難であった。

この合成法においては、DBBA の吸着量、末端前駆体の吸着量、2 種の前駆体の蒸着順序、蒸着前の基板の加熱の有無とその加熱温度・時間、共吸着後の基板の加熱温度・時間など、様々な作製パラメータが存在しており、新構造の GNR の収率を上げるのは、それらの最適条件を見つける必要があることが判明した。

(2) ナノリボン本体の高品質化

(1)に記した通り、表面合成法で得られる GNR には欠陥・副生成物が多く品質に難があることが課題であった。そこで、DBBA のみを前駆体として使用した場合（すなわち、末端前駆体を使用しない既知の合成法）における試料作製パラメータの改善を試み、7-AGNR の品質向上を試みた。図 2 は、Au(111)表面上で DBBA を蒸着・加熱して得られる GNR の AFM 像である。高空間分解能によって欠陥の原子構造を特定し、脱水素環化後のラジカルの残留によって異常接合が起こりやすくなることを提唱した。さらに、GNR の品質の吸着量依存性を高分子化学で用いるパラメータによって定量的に評価し、前駆体の吸着量が多いほど欠陥が少なくリボン長が長い GNR が得られることを明らかにした。この成果は原著論文として国際学術誌に掲載された。

(3) 新規ナノリボン分子の機能性の実証

(1), (2)で得られた知見を用いることで、ラジカルキャッピング法による新規リボン分子の高品質合成に成功し、その構造評価と機能発現を行った。

末端前駆体との結合によって、末端が立体的に突き出した GNR が得られたことを、原子間力顕微鏡による高空間分解能イメージングによって確認した。その末端が座屈バネ(スプリングワッシャー)型の炭素骨格であることが AFM 観察により示された。その末端に AFM の探針を接近させたところ(図 3) バネ型の構造が反転(フリップ)する構造変化が誘起された。AFM による精密な力計測により、探針先端とリボンの突き出した炭素原子との間のパウリ斥力による機械的刺激によって構造変化が起こることが示された。この構造変化は探針制御により選択的・可逆的に誘起できることから、分子スイッチとして動作することが実証された。以上のことから、(当初の狙いである機械的振動特性とは異なる機能ではあるが、)新規ナノリボン分子を合成し、それが機械的刺激によって分子スイッチとして働くという機能発現を単分子レベルで実証するという目的を達成した。この成果は原著論文として国際学術誌に投稿中である。

(4) その他の研究成果

上記の研究目的達成までの過程において、様々な試料の AFM 実験を実施し、高空間分解能イメージングや物性・機能の精密評価・制御に関するノウハウを高めた。イメージングに関しては、絶縁体である氷表面のサブナノスケール観察や、銅表面上のギ酸の水素結合ネットワークの観察と加熱によるギ酸分解の触媒反応過程の追跡、バンドギャップが小さい新規 GNR の高分解能観察などを実施した。単分子の機能制御に関しては、探針接近によって C-H 結合を切断するナノグラフェンの反応制御や、一酸化窒素分子の機械的刺激スイッチの精密測定を行った。これらの知見は、(3)に記した立体的な GNR (図 3) の構造決定とスイッチング計測に大きく活かされた。

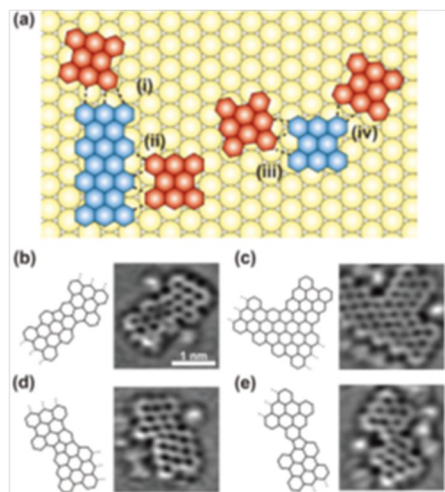


図 2 : Au(111)表面上で DBBA から得られる GNR に見られた様々な欠陥の構造と AFM 像。[A. Ishii, A. Shiotari, Y. Sugimoto, *Nanoscale* 12, 6651 (2020). Reproduced by permission of The Royal Society of Chemistry.]

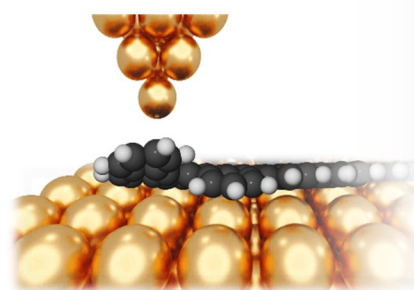


図 3 : Au(111)表面上にヘテロアッセムリーによって合成した末端が突き出した GNR と、それに接近する AFM 探針の模式図。さらに探針を接近させることで突き出した領域が押し込まれ、構造フリップが起こった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Shiotari Akitoshi, Sugimoto Yoshiaki, Kamio Hiroshi	4. 巻 3
2. 論文標題 Characterization of two- and one-dimensional water networks on Ni(111) via atomic force microscopy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 093001(R)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevMaterials.3.093001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 H. Isshiki, K. Kondou, S. Takizawa, K. Shimose, T. Kawabe, E. Minamitani, N. Yamaguchi, F. Ishii, A. Shiotari, Y. Sugimoto, S. Miwa, Y. Otani	4. 巻 19
2. 論文標題 Realization of Spin-dependent Functionality by Covering a Metal Surface with a Single Layer of Molecules	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 7119 ~ 7123
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.9b02619	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 H. Gamou, K. Shimose, R. Enoki, E. Minamitani, A. Shiotari, Y. Kotani, K. Toyoki, T. Nakamura, Y. Sugimoto, M. Kohda, J. Nitta, S. Miwa	4. 巻 20
2. 論文標題 Detection of Spin Transfer from Metal to Molecule by Magnetoresistance Measurement	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 75 ~ 80
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.9b03110	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ishii Ayumu, Shiotari Akitoshi, Sugimoto Yoshiaki	4. 巻 12
2. 論文標題 Quality control of on-surface-synthesised seven-atom wide armchair graphene nanoribbons	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nanoscale	6. 最初と最後の頁 6651 ~ 6657
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C9NR10942K	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shiotari Akitoshi, Odani Takafumi, Sugimoto Yoshiaki	4. 巻 121
2. 論文標題 Torque-Induced Change in Configuration of a Single NO Molecule on Cu(110)	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 116101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.121.116101	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yamaguchi Junichi, Hayashi Hironobu, Jippo Hideyuki, Shiotari Akitoshi, Ohtomo Manabu, Sakakura Mitsuhiro, Hieda Nao, Aratani Naoki, Ohfuchi Mari, Sugimoto Yoshiaki, Yamada Hiroko, Sato Shintaro	4. 巻 1
2. 論文標題 Small bandgap in atomically precise 17-atom-wide armchair-edged graphene nanoribbons	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Communications Materials	6. 最初と最後の頁 36
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s43246-020-0039-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Naoya Kawakami, Kota Iwata, Akitoshi Shiotari, Yoshiaki Sugimoto	4. 巻 6
2. 論文標題 Intrinsic reconstruction of ice-I surfaces	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 eabb7986
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.abb7986	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Shiotari Akitoshi, Hamada Ikutaro, Nakae Takahiro, Mori Shigeki, Okujima Tetsuo, Uno Hidemitsu, Sakaguchi Hiroshi, Hamamoto Yuji, Morikawa Yoshitada, Sugimoto Yoshiaki	4. 巻 20
2. 論文標題 Manipulable Metal Catalyst for Nanographene Synthesis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 8339 ~ 8345
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.0c03510	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Feng Lingyu, Shiotari Akitoshi, Yabuoshi Keisuke, Fukuda Masahiro, Ozaki Taisuke, Sugimoto Yoshiaki	4. 巻 5
2. 論文標題 Structure of one-dimensional monolayer Si nanoribbons on Ag(111)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 34002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevMaterials.5.034002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shiotari Akitoshi, Putra Septia Eka Marsha, Shiozawa Yuichiro, Hamamoto Yuji, Inagaki Kouji, Morikawa Yoshitada, Sugimoto Yoshiaki, Yoshinobu Jun, Hamada Ikutaro	4. 巻 -
2. 論文標題 Role of Intermolecular Interactions in the Catalytic Reaction of Formic Acid on Cu(111)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Small	6. 最初と最後の頁 2008010
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/smll.202008010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shiotari Akitoshi, Koshida Hiroyuki, Okuyama Hiroshi	4. 巻 76
2. 論文標題 Adsorption and valence electronic states of nitric oxide on metal surfaces	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Surface Science Reports	6. 最初と最後の頁 100500
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.surfrep.2020.100500	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計35件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 塩足亮隼、神尾浩史、杉本宜昭
2. 発表標題 原子間力顕微鏡によるNi(111)表面上の水単層膜の構造決定
3. 学会等名 日本表面真空学会2019年度 関東支部学術講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石井歩、尾谷卓史、塩足亮隼、杉本宜昭
2. 発表標題 前駆体蒸着量がグラフェンナノリボンの表面合成に与える影響
3. 学会等名 日本表面真空学会2019年度 関東支部学術講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A. Shiotari, H. Kamio, Y. Sugimoto
2. 発表標題 Characterization of water monolayers on Ni(111) by atomic force microscopy
3. 学会等名 22nd International Conference on Non-Contact Atomic Force Microscopy (NCAFM2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A. Shiotari, T. Odani, T. Pham, Y. Hamamoto, Y. Morikawa, I. Hamada, Y. Sugimoto
2. 発表標題 Mechanical toggle switch of a nitric oxide molecule
3. 学会等名 22nd International Conference on Non-Contact Atomic Force Microscopy (NCAFM2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 一色弘成、近藤浩太、瀧澤誓、下瀬弘輝、河辺健志、南谷英美、山口直也、石井史行、塩足亮隼、杉本宜昭、三輪真嗣、大谷義近
2. 発表標題 単分子膜で修飾された金属表面のスピン依存機能性
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 塩足亮隼、神尾浩史、杉本宜昭
2. 発表標題 高分解能原子間力顕微鏡によるNi(111)表面上の水単層膜の構造決定
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菊池明日香、塩足亮隼、杉本宜昭、森川良忠、濱田幾太郎
2. 発表標題 Cu(110)上における水クラスターの密度汎関数理論による研究
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 塩足亮隼、神尾浩史、杉本宜昭
2. 発表標題 原子間力顕微鏡によるNi(111)表面上の水単層膜の構造解明
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 尾谷卓史、塩足亮隼、杉本宜昭
2. 発表標題 Cu(110)表面上 NO 単分子のスイッチ機能の開発
3. 学会等名 2019年日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石井歩、塩足亮隼、杉本宜昭
2. 発表標題 前駆体蒸着量の変化によるグラフェンナノリボンの形状制御
3. 学会等名 2019年日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 塩足亮隼、神尾浩史、杉本宜昭
2. 発表標題 Ni(111)表面上の水単層膜の原子間力顕微鏡観察
3. 学会等名 2019年日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A. Shiotari, T. Odani, T. N. Pham, Y. Hamamoto, Y. Morikawa, I. Hamada, Y. Sugimoto
2. 発表標題 Torque-induced switching of NO on Cu(110) by atomic force microscopy
3. 学会等名 The 81st Okazaki Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Isshiki, K. Kondou, S. Takizawa, K. Shimose, T. Kawabe, E. Minamitani, N. Yamaguchi, F. Ishii, A. Shiotari, Y. Sugimoto, S. Miwa, Y. Otani
2. 発表標題 Spin-to-charge current conversion at a molecule/metal interface
3. 学会等名 New Perspective in Spin Conversion Science (NPSCS2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 塩足亮隼、尾谷卓史、Thanh Ngoc Pham、濱本雄治、森川良忠、濱田幾太郎、杉本宜昭
2. 発表標題 Cu(110)表面上のNO 単分子のトグルスイッチ動作とその機構解明
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石井歩、塩足亮隼、杉本宜昭
2. 発表標題 前駆体蒸着量によるボトムアップ合成グラフェンナノリボンの構造制御
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 塩足亮隼、菊池明日香、森川良忠、濱田幾太郎、杉本宜昭
2. 発表標題 原子間力顕微鏡によるCu(110)表面上の水分子クラスターの構造解明
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岩田孝太、川上直也、塩足亮隼、杉本宜昭
2. 発表標題 原子間力顕微鏡による氷表面の局所構造の観察
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 塩足亮隼、尾谷卓史、杉本宜昭
2. 発表標題 原子間力顕微鏡によるCu(110)表面上のNO単分子のトグルスイッチ制御
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 塩足亮隼、塩澤佑一郎、杉本宜昭、吉信淳
2. 発表標題 Cu(111)表面上に吸着したギ酸のナノスケール構造解明
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 塩足亮隼、尾谷卓史、杉本宜昭
2. 発表標題 原子間力顕微鏡による銅表面上の一酸化窒素単分子のトグルスイッチ制御
3. 学会等名 2018年日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 塩足亮隼
2. 発表標題 単分子トグルスイッチ：NO/Cu(110)の配向変化の観測と制御
3. 学会等名 日本顕微鏡学会走査型プローブ顕微鏡分科会「超高空間分解能SPMの最前線」（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 尾谷卓史、塩足亮隼、杉本宜昭
2. 発表標題 NO 修飾探針の作製とSTM 像シミュレーション
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 塩足亮隼、尾谷卓史、杉本宜昭
2. 発表標題 斥力誘起による銅表面上の一酸化窒素単分子の配向変化制御
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 塩足亮隼、塩澤佑一郎、杉本宜昭、吉信淳
2. 発表標題 STM/AFMおよびIRASによるCu(111)表面上のギ酸の吸着構造解明
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 塩足亮隼、濱田幾太郎、中江隆博、森重樹、奥島鉄雄、宇野英満、坂口浩司、濱本雄治、森川良忠、杉本宜昭
2. 発表標題 SPM探針による芳香族分子の脱水素化のピンポイント誘起
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 塩足亮隼
2. 発表標題 高空間分解能原子間力顕微鏡を用いた単分子の化学反応制御
3. 学会等名 化学反応経路探索のニューフロンティア2020 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石井歩、塩足亮隼、杉本宜昭
2. 発表標題 末端修飾によるスイッチ機能を有するグラフェンナノリボンの開発
3. 学会等名 2020年日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Lingyu Feng, Akitoshi Shiotari, Masahiro Fukuda, Taisuke Ozaki, Yoshiaki Sugimoto
2. 発表標題 Structure of one-dimensional monolayer Si nanoribbons on Ag(111)
3. 学会等名 2020年日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岩田孝太、川上直也、塩足亮隼、杉本宜昭
2. 発表標題 原子間力顕微鏡による氷表面構造の高分解能観察
3. 学会等名 2020年日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 塩足亮隼、濱田幾太郎、中江隆博、森重樹、奥島鉄雄、宇野英満、坂口浩司、濱本雄治、森川良忠、杉本宜昭
2. 発表標題 金属探針の接近による脱水素化反応の誘起とナノグラフェン分子の生成
3. 学会等名 2020年日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Junichi Yamaguchi , Hironobu Hayashi, Hideyuki Jippo, Akitoshi Shiotari, Manabu Ohtomo, Mitsuhiro Sakakura , Nao Hieda, Naoki Aratani, Mari Ohfuchi, Yoshiaki Sugimoto, Hiroko Yamada, and Shintaro Sato
2. 発表標題 Electronic properties of bottom-up synthesized 17- and 13-atom-wide graphene nanoribbons
3. 学会等名 MRS Fall meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Iwata, N. Kawakami, A. Shiotari, Y. Sugimoto
2. 発表標題 High Resolution Imaging of Ice-I surface by Atomic Force Microscopy
3. 学会等名 28th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM28) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 塩足亮隼
2. 発表標題 一酸化窒素の表面吸着構造と価電子状態の単分子レベル制御
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 塩足亮隼、石井歩、杉本宜昭
2. 発表標題 表面合成法によるアームチェア型グラフェンナノリボンの末端制御とその構造評価
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 林宏暢、山口淳一、實宝秀幸、塩足亮隼、大伴真名歩、荒谷直樹、大淵真里、杉本宜昭、佐藤信太郎、山田容子
2. 発表標題 炭素原子17個分の幅を有するアームチェア型グラフェンナノリボンの基板上合成
3. 学会等名 日本化学会第101春季年会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 杉本宜昭、塩足亮隼	4. 発行年 2018年
2. 出版社 化学同人	5. 総ページ数 4
3. 書名 分子力学計測（日本化学会編「分子アーキテクトニクス(CSJ:31)」Part II, Chapter 6）	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>東京大学プレスリリース「分子1個でできた世界最小のレバー型スイッチをON！」http://www.k.u-tokyo.ac.jp/info/entry/22_entry672/</p> <p>東京大学プレスリリース「銅に色素を塗るだけでスピン変換機能を発現」http://www.k.u-tokyo.ac.jp/info/entry/22_entry764/</p> <p>東京大学プレスリリース「氷表面の原子レベル観察に成功」http://www.k.u-tokyo.ac.jp/info/entry/22_entry903/</p> <p>東京大学プレスリリース「針型金属触媒の超精密操作によりナノ炭素材料を合成 - 銅の針を近づけるだけで分子から水素原子が引き抜かれる化学反応を発見 - 」 https://www.k.u-tokyo.ac.jp/information/category/news/3756.html</p>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	杉本 宜昭 (Sugimoto Yoshiaki)	東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授 (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関