

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H00856

研究課題名(和文)超高分解能原子間力顕微鏡を用いた単分子化学と炭素ナノ構造体の新展開

研究課題名(英文)Single molecular chemistry with high-resolution atomic force microscopy and investigation of magnetic properties of nanocarbon structures

研究代表者

川井 茂樹(KAWAI, Shigeki)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・先端材料解析研究拠点・グループリーダー

研究者番号：30716395

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,100,000円

研究成果の概要(和文)：探針を制御した高分解能走査型プローブ顕微鏡技術を発展させ、高分解能観察による分子構造決定をはじめとした、多機能な炭素ナノ構造体の創生に繋がるさまざまな表面化学反応の開発、三次元のグラフェンナノリボンの合成、グラフェンナノリボンの接合技術の開発、それらのデバイス展開に必要な電気的デカップリング膜の評価、さらに、探針を用いた単分子レベルの化学を実現することができた。特に単分子からハロゲン原子を脱離させ、ラジカル状態の制御、付加反応による安定化、構造異性化による安定化など、単分子レベルの化学として興味深い知見を得ることが出来た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

単分子の構造を直接的に見ることが出来る高分解能走査型プローブ顕微鏡は、近い将来の分子エレクトロニクスの素子として展開できる炭素ナノ構造体の創生に於いて欠かせない技術であり、有機合成で生成した小分子を出発としたボトムアップ合成が可能となる表面化学において学術的意義が高と云える。本件では、さまざまな表面反応の開発や評価手法の開発、更に、単分子レベルでの探針を用いた化学反応など重要な学術・技術展開をすることができたと考えられる。その中でも、探針を用いた局所反応は、有機化学では研究が困難な領域であり、今後の展開が期待できる。

研究成果の概要(英文)：In this project, we further developed high-resolution scanning probe microscopy with a functionalized tip, identified the molecular structures via the bond-resolved imaging, invented new on-surface chemical reactions for various nanocarbon structures, synthesized three-dimensional graphene nanoribbons and atomically defined junctions between graphene nanoribbons, and analyzed the intercalation layer for the electronic decoupling as well as investigated local probe chemistry. It is worth noting that we have demonstrated the stabilization of radical species, which was obtained via tip-induced dehalogenation, by addition reaction and structural isomerization, that is local probe chemistry.

研究分野：表面化学

キーワード：表面化学 走査型トンネル顕微鏡 原子間力顕微鏡 単分子

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

長年にわたり、走査型トンネル顕微鏡 (STM) を用いて単分子化学が行われてきた。しかし、トンネル電流は基板への吸着状態で変化する分子軌道に反映し、観察のみの骨格解析は困難である。近年、探針先端を一酸化炭素で終端させた原子間力顕微鏡 (AFM) を用いて分子の骨格をじかに観察できるようになり、表面化学の研究に大きな転機を迎えた。特に、表面での化学反応では生成物の構造を単分子レベルで同定する必要があり、本計測手法の重要性は高まっている。表面化学反応では、有機化学で合成した小分子をブロックの如く接合させ、原子レベルで構造が決まった炭素ナノ構造体の合成が可能である。また、走査型トンネル顕微鏡や原子間力顕微鏡の探針を用いて、単分子レベルの構造を操作する局所反応などが報告されている。しかしながら、本研究分野はいまだに黎明期にあり、更なる展開が強く望まれている。特に、分子の構造を観察できる本計測技術の更なる発展は非常に重要と考えられる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、次世代材料と期待できるオールカーボンデバイスを実現するため、(i) 表面化学に必要な AFM/STM 測定技術の確立、(ii) 探針による局所化学の発展、(iii) 表面化学反応の高度化、を実現することである。近年の AFM 測定技術の発展で、芳香族炭化水素の骨格構造の観察が可能になった。しかし、現状では未知骨格や励起状態を有する化合物の評価は、困難である。

そこで、直接的に単分子や高分子の構造や状態の同定が可能な AFM 解析技術を、更に高める。これらの技術は、本研究で開発する局所合成反応や表面化学反応で生成するさまざまな小分子や高分子の構造を同定できる究極のツールになると期待できる。

3. 研究の方法

本研究は、高分解能 AFM/STM と表面化学の融合を目指し、Task1 から 3 までの主テーマから構成される。(i) 表面化学に必要な AFM 測定技術の確立、(ii) 探針による局所化学の発展、(iii) 表面化学反応の高度化、である。各テーマは相互補完する繋がりが強い研究である。この中で、局所化学反応の展開を目指して、チューニングフォークを力検出素子とした新規の極低温超高真空の製作を行う。一般的に、装置開発には時間を要するため、並行して各研究課題に取り組む必要がある。特に表面反応の高度化には、新しい表面反応の開発、それによる新奇炭素ナノ構造体の合成、更に、それを用いた計測技術の開発などの展開が見込まれる。

4. 研究成果

(1) 局所探針化学に向けた三次元グラフェンナノリボンの合成^[1]

近年の最先端プローブ顕微鏡の発展により、探針による反応やその生成物の内部構造を観察できる単分子の化学が遂行できるようになった。本研究では、表面で起こす化学反応による三次元のグラフェンナノリボンを合成し、その構造の特異性を利用した局所探針化学を遂行した (図 1)。まず、臭素を 6 つ導入したプロペラ型の分子を Au(111) や Ag(111) 表面上に蒸着し、加熱によるホモカップリングを経て、三次元状のグラフェンナノリボンの合成に成功した。基板から垂直方向に飛び出ている臭素原子はこの表面合

成を経た後でも残っていることを確認した。まず、1つの臭素原子を探針からのトンネル電流で脱離させ、ラジカルの生成に成功した。その過程で、探針先端が三次元グラフェンナノリボンから取り除いた臭素元素で終端されることも分かった。この臭素探針をラジカル部分に近づけることで、再び分子に接合できると分かった。次に、三次元グラフェンナノリボンのユニットから出ている2つの臭素を取り除き、その部分にフラレン分子を近づけたところ導入できることが分かった。言い換えると、局所探針化学による付加反応の実現である。これら脱離反応・付加反応のメカニズムを理論計算で解明した。このように、新規合成した三次元グラフェンナノリボンを用いると基板からデカップリングされたところで、単分子レベルの局所反応を遂行できることを示した。

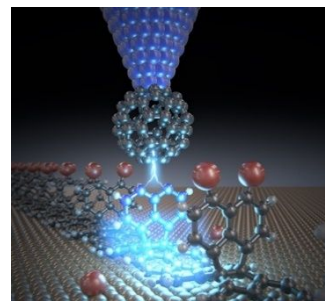


図1 三次元グラフェンナノリボンの概略図

(2) 局所探針化学による単分子 Sondheimer-Wong ジーン分子の吸エルゴンの合成^[2]

項目2と同様に最先端のプロブ顕微鏡を用いることで分子の内部構造の直接観察や探針を用いた局所的な化学反応ができるようになった。これにより、通常的环境下では不安定で短寿命な生成物の合成とその解析が実現された。本研究では、超高真空かつ極低温的环境下

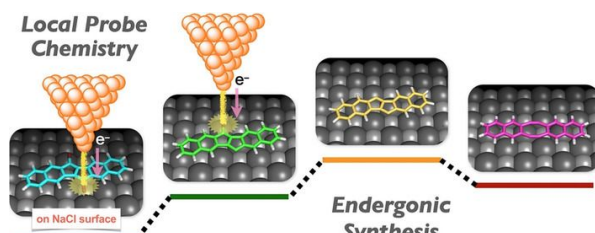


図2 探針による単分子の脱臭素反応と構造異性化

にある Cu(111)表面上に生成した NaCl 薄膜上で、6,13-dibromopentaleno[1,2-b:4,5-b']dinaphthalene 分子から Sondheimer-Wong ジーン単分子の合成に成功した(図2)。前駆体分子、二つの中間体、そして生成物のジーン分子の構造を一酸化炭素で終端した探針を用いて同定した。また、DFT 計算を行ったところ、この反応は吸エルゴンのであり、銅探針と銅基板のナノジャンクションにある絶縁体薄膜上に吸着した分子が、トンネル電流によって充電や放電されることで反応が進むことが判明した。この手法を展開することで、さまざまなナノ炭素構造体の合成に繋がるものと考えられる。

(3) 拡張したジアザ[8]サーキュレンの表面合成^[3]

複素環式[8]サーキュレン分子は、その特徴的な構造に由来した特性やアプリケーションのために、多環芳香族炭化水素のなかでも重要な分子群である。しかし、その複素環式[8]サーキュレンの合成例はいまだに限られており、合成自体が挑戦的な課題である。本研究では、溶液中と表面の合成を組み合わせることで、6つの六員環と2つの五員環が融合したジアザ[8]サーキュレンの合成を実現した(図3)。一酸化炭素分子で修飾した探針を用いた最先端の STM と DFT 計算により、その平坦な構造や電子状態を解明した。

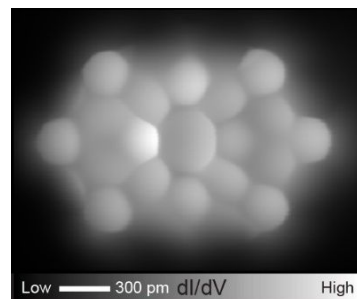


図3 合成したジアザ[8]サーキュレンの高分解能観察

(4) Au(111)に吸着したナノグラフェンの複素環の開環^[4]

加熱による脱水素を伴う環化は、金属表面に吸着した分子を平坦化させる重要な反応で

ある。炭素-炭素結合を生成させることによって多環芳香族炭化水素の合成とは異なり、単分子内の炭素-窒素結合の重合と開裂はあまり報告例がない。本研究では、Au(111)上に吸着させた 11,11,12,12-tetraphenyl-1,4,5,8-

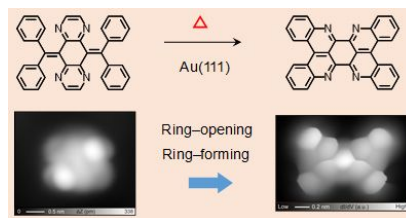


図4 . ナノグラフェンの複素間の閉環と開環の概略図

tetraazaanthraquinodimethane 分子とその誘導体を用いて系統立てた化学反応を実現した(図4)。分子の内部構造を観察できる STM を用いることで、窒素原子を二つ含むピラジンリングから窒素を一つ含むキノリンリングが生成される複素環分離が起きることを判明した。DFT 計算により、単分子内の窒素を含む複素間の閉環と開環は、反応初期に起きる水素と基板の相互作用に強く依存することが分かった。

(5) Ag(111)上のシリレンで繋がれた菌頭カップリングによるオリゴマー化^[5]

表面合成は、共役系ナノ構造を作るための重要な手法である。本研究では、Ag(111)上でシリルエチニルと塩素を導入した一部がフッ素で末端されたフェニレンエチニレン分子(SiCPFPEs)のトリメチルシリルエチニル基とクロロフェニル基の間で化学選択性がある菌頭カップリングを実現した(図5)。脱シリルの菌頭カップリングは、75%の化学選択性があり、競合するウルマンタイプや脱シリルレーザーホモカップリングを抑え込むことが分かった。分子の内部構造を観察できる STM や原子間力顕微鏡に加え、DFT 計算により、130 度の加熱で CH₃-Si 結合が活性化され、分子間がシリレンテザー(-Me₂Si-)で繋がれたオリゴマーが生成することが分かった。更に高温の 200 度では、テザーが取れたオリゴマーになることが分かった。

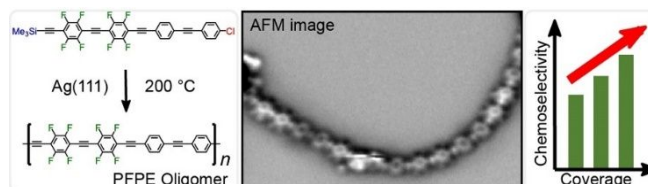


図5 .表面での菌頭反応によるオリゴマー合成

(6)複数の空孔を持つ分子ネットワーク内で発生する表面状態共鳴により安定化されたフェルミ近傍のスーパーアトム状態^[6]

二次元のハニカム構造の分子ネットワークは、その空孔の中で基板表面の電子を幽閉し、量子的な電子の散乱現象を研究するための理想的な場である。表面準位の幽閉に加え、横方向に飛び出た有機化合物の状態は、その小さな空孔では混成することによりスーパーアトム分子軌道になる。この二つの空孔状態はナノキャビティ

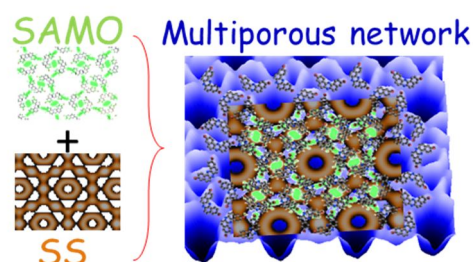


図6 . 分子膜による表面準位とスーパーアトム分子状態の相互作用

で共に存在する可能性があるが、その共存や相互作用については未知であった。本研究では、STM や DFT 計算に加え、電子平面波展開シミュレーションを用いて、Ag(111)上に成長させた複数の空孔を持つ 2 次元のハニカム結合膜の中にあるもっとも小さなナノキャビティに、これら二つの空孔状態が存在することを示した(図6)。スーパーアトム分子軌道は表面状態の幽閉との混成で安定化され、そのエネルギー準位が著しく下げられることが分かった。この発見は、2 次元ナノ空孔システムを使った表面電子構造の更なる制御に繋がると考えられる。

(7) 脱フッ化カップリングによるポルフィリン複合体のマルチブロックコオリゴマーの表面合成^[7]

ボトムアップアプローチである表面化学合成は、小さな分子をリンクさせることでナノ構造体を合成できる非常に重要な技術である。しかし、反応温度においてほとんどの反応物は同時に活性化されるため、制御された逐次反応は困難である。そこで、本研究では、トリフルロメチル基(CF₃)を導入したポルフィリンの有機金属錯体から複数のユニットを持つブロックコオリゴマーの表面合成を実現した(図7)。Au(111)上でオリゴマー化は分子の構造を観察できるプローブ顕微鏡とDFT計算によって解明した。一つのモノマーからのオリゴマー化の後

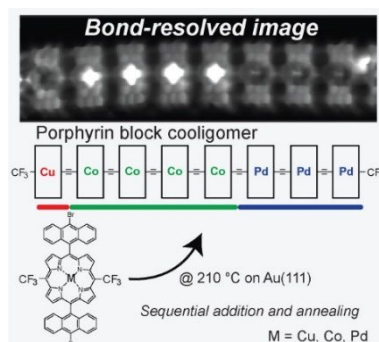


図7. ポルフィリンブロックコオリゴマーの合成

でも、その両端にCF₃基が残っており、それが逐次的反応に使えることが分かった、この結果、銅、コバルト、パラジウム金属を錯体とした、ビスアントラセンを融合したポルフィリンのオリゴマーを意図した順番に接合できることを示した。

(8) 局所探針反応に特化した極低温超高真空 AFM/STM システムの構築

本研究課題中に、所属する研究機関内で異動があり、それに伴って全ての研究設備を異なる研究地区にある新しい実験室へ移設する必要があった。その移設には研究室の整備、稼働中の装置を一旦解体・組み立て・調整をする必要があった。これらは本研究課題が始まったときに予想されていなかったことであり、残念ながら本研究項目である装置開発に影響が生じてしまった。既にチューニングタイプの顕微鏡・チャンバー・真空ポンプ機構・試料搬送機構・クライオスタット・試料パーキング・スパッタリング機構・試料加熱記憶などほとんどの部分が製作済みである。低温マニピュレータの試料固定台など若干の小部品を製作する必要があるが、ほぼ稼働できるところまで進めることができた。

<参考文献>

1. S. Kawai, O. Krejčí, T. Nishiuchi, K. Sahara, T. Kodama, R. Pawlak, E. Meyer, T. Kubo, A. S. Foster, *Science Advances* **2020**, 6, eaay8913.
2. S. Kawai, H. Sang, L. Kantorovich, K. Takahashi, K. Nozaki, S. Ito, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2020**, 59, 10842-10847.
3. K. Nakamura, Q.-Q. Li, O. Krejci, A. S. Foster, K. Sun, S. Kawai, S. Ito, *J. Am Chem. Soc.* **2020**, 142, 11363-11369.
4. K. Sun, K. Sugawara, A. Lyalin, Y. Ishigaki, K. Uosaki, T. Taketsugu, T. Suzuki, S. Kawai, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2021**, 60, 9427-9432.
5. K. Sun, K. Sagisaka, L. Peng, H. Watanabe, F. Xu, R. Pawlak, E. Meyer, Y. Okuda, A. Orita, S. Kawai, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2021**, 60, 19598-19603.
6. S. Kawai, M. A. Kher-Elden, A. Sadeghi, Z. M. Abd El-Fattah, K. Sun, S. Izumi, S. Minakata, Y. Takeda, J. Lobo-Checa, *Nano Lett.* **2021**, 21, 6456-6462.
7. S. Kawai, A. Ishikawa, S. Ishida, T. Yamakado, Y. Ma, K. Sun, Y. Tateyama, R. Pawlak, E. Meyer, S. Saito, A. Osuka, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2022**, 61, e202114697.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 13件 / うち国際共著 9件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kawai Shigeki, Ishikawa Atsushi, Ishida Shin ichiro, Yamakado Takuya, Ma Yujing, Sun Kewei, Tateyama Yoshitaka, Pawlak Remy, Meyer Ernst, Saito Shohei, Osuka Atsuhiko	4. 巻 61
2. 論文標題 On Surface Synthesis of Porphyrin Complex Multi Block Co Oligomers by Defluorinative Coupling	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Angewandte Chemie International Edition	6. 最初と最後の頁 e202114697_1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/anie.202001268	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 該当する
1. 著者名 川井 茂樹	4. 巻 91
2. 論文標題 プローブ顕微鏡を用いた “Local Probe Chemistry” によるナノ物質の創出	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 応用物理	6. 最初と最後の頁 356 ~ 360
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11470/oubutsu.91.6_356	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 Kawai Shigeki, Ishikawa Atsushi, Ishida Shin ichiro, Yamakado Takuya, Ma Yujing, Sun Kewei, Tateyama Yoshitaka, Pawlak Remy, Meyer Ernst, Saito Shohei, Osuka Atsuhiko	4. 巻 61
2. 論文標題 On Surface Synthesis of Porphyrin Complex Multi Block Co Oligomers by Defluorinative Coupling	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Angewandte Chemie International Edition	6. 最初と最後の頁 e202114697_1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/anie.202114697	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 該当する
1. 著者名 Kawai Shigeki, Kher-Elden Mohammad A., Sadeghi Ali, Abd El-Fattah Zakaria M., Sun Kewei, Izumi Saika, Minakata Satoshi, Takeda Youhei, Lobo-Checa Jorge	4. 巻 21
2. 論文標題 Near Fermi Superatom State Stabilized by Surface State Resonances in a Multiporous Molecular Network	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 6456 ~ 6462
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.1c01200	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 該当する

1. 著者名 Sun Kewei, Sagisaka Keisuke, Peng Lifan, Watanabe Hikaru, Xu Feng, Pawlak Remy, Meyer Ernst, Okuda Yasuhiro, Orita Akihiro, Kawai Shigeki	4. 巻 60
2. 論文標題 Head to Tail Oligomerization by Silylene Tethered Sonogashira Coupling on Ag(111)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Angewandte Chemie International Edition	6. 最初と最後の頁 19598 ~ 19603
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/anie.202102882	査読の有無 無
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 川井茂樹	4. 巻 36
2. 論文標題 高分解能原子間力顕微鏡を用いた清浄表面上のナノトライボロジー	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 月刊トライボロジー	6. 最初と最後の頁 40 ~ 43
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Kawai Shigeki, Sang Hongqian, Kantorovich Lev, Takahashi Keisuke, Nozaki Kyoko, Ito Shingo	4. 巻 59
2. 論文標題 An Endergonic Synthesis of Single Sondheimer-Wong Diyne by Local Probe Chemistry	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Angewandte Chemie International Edition	6. 最初と最後の頁 10842 ~ 10847
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/anie.202001268	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 該当する

1. 著者名 Nakamura Kimihiro, Li Qiang-Qiang, Krejci Ondrej, Foster Adam S., Sun Kewei, Kawai Shigeki, Ito Shingo	4. 巻 142
2. 論文標題 On-Surface Synthesis of a -Extended Diaza[8]circulene	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the American Chemical Society	6. 最初と最後の頁 11363 ~ 11369
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.0c02534	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 該当する

1. 著者名 Sun Kewei、Nishiuchi Tomohiko、Sahara Keisuke、Kubo Takashi、Foster Adam S.、Kawai Shigeki	4. 巻 124
2. 論文標題 Low-Temperature Removal of Dissociated Bromine by Silicon Atoms for an On-Surface Ullmann Reaction	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 19675 ~ 19680
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.0c06188	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 該当する

1. 著者名 Sun Kewei、Sugawara Kazuma、Lyalin Andrey、Ishigaki Yusuke、Uosaki Kohei、Taketsugu Tetsuya、Suzuki Takanori、Kawai Shigeki	4. 巻 60
2. 論文標題 Heterocyclic Ring Opening of Nanographene on Au(111)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Angewandte Chemie International Edition	6. 最初と最後の頁 9427 ~ 9432
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/anie.202017137	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 Sun Kewei、Kawai Shigeki	4. 巻 23
2. 論文標題 Strength of electronic decoupling of fullerene on an AuSiX layer formed on Au(111)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Chemistry Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 5455 ~ 5459
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D0CP05764A	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 川井茂樹	4. 巻 9
2. 論文標題 単分子の構造をいかに操るか? -超高分解能走査型プローブ顕微鏡を用いた局所化学	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 化学	6. 最初と最後の頁 70 ~ 71
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 Kawai Shigeki, Krejci Ondrej, Nishiuchi Tomohiko, Sahara Keisuke, Kodama Takuya, Pawlak Remy, Meyer Ernst, Kubo Takashi, Foster Adam S.	4. 巻 6
2. 論文標題 Three-dimensional graphene nanoribbons as a framework for molecular assembly and local probe chemistry	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 eaay8913
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.aay8913	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 該当する

1. 著者名 Sun Kewei, Krejci Ondrej, Foster Adam S., Okuda Yasuhiro, Orita Akihiro, Kawai Shigeki	4. 巻 123
2. 論文標題 Synthesis of Regioisomeric Graphene Nanoribbon Junctions via Heteroprecursors	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 17632 ~ 17638
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.9b05881	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 該当する

1. 著者名 Talirz Leopold, Soede Hajo, Kawai Shigeki, Ruffieux Pascal, Meyer Ernst, Feng Xinliang, Muellen Klaus, Fasel Roman, Pignedoli Carlo A., Passerone Daniele	4. 巻 20
2. 論文標題 Band Gap of Atomically Precise Graphene Nanoribbons as a Function of Ribbon Length and Termination	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ChemPhysChem	6. 最初と最後の頁 2348 ~ 2353
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/cphc.201900313	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 該当する

1. 著者名 川井茂樹	4. 巻 68
2. 論文標題 原子間力顕微鏡を用いたグラフェンナノリボンの物性評価	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 高分子	6. 最初と最後の頁 650 ~ 651
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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13件(うち招待講演 9件/うち国際学会 7件)

1. 発表者名 K. Sun, K. Sagisaka, L. Peng, H. Watanabe, F. Xu, R. Pawlak, E. Meyer, Y. Okuda, A. Orita, S. Kawai
2. 発表標題 Silylene-Tethered Sonogashira Cross-Coupling on Ag(111)
3. 学会等名 The 29th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Kawai, A. Ishikawa, S. Ishida, T. Yamakado, Y. Ma, K. Sun, Y. Tateyama, R. Pawlak, E. Meyer, S. Saito, A. Osuka
2. 発表標題 On-Surface Synthesis of Multi-Block Co-Oligomers by Defluorinative Coupling of CF ₃ -Substituted Aromatic Systems
3. 学会等名 The 29th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川井茂樹
2. 発表標題 顕微鏡でパイナノだ
3. 学会等名 第11回 CSJ化学フェスタ(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shigeki Kawai
2. 発表標題 On-surface syntheses of nanocarbon structures studied with high-resolution scanning probe microscopy
3. 学会等名 The 5th international symposium "Elucidation of Property of Next Generation Functional Materials and Surface/Interface" (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Kawai, O. Krejci, T. Nishiuchi, K. Sahara, T. Kodama, R. Pawlak, E. Meyer, T. Kubo, A. S. Foster
2. 発表標題 Three-Dimensional Graphene Nanoribbons as a Framework for Molecular Assembly and Local Probe Chemistry
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 川井茂樹
2. 発表標題 原子間力顕微鏡を用いた 清浄表面および分子鎖の摩擦計測
3. 学会等名 第28回分子シミュレーションのトライボロジーへの応用研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shigeki Kawai
2. 発表標題 Three-dimensional Graphene Nanoribbon as a Framework for Molecular Assembly and Local Probe Chemistry
3. 学会等名 The 4th international symposium "Elucidation of Property of Next Generation Functional Materials and Surface/Interface" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川井 茂樹
2. 発表標題 炭素ナノ構造体の表面化学合成と原子間力顕微鏡をもちいた構造評価
3. 学会等名 第46回炭素材料学会年会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川井 茂樹
2. 発表標題 原子間力顕微鏡でおこなう単分子化学
3. 学会等名 走査型プローブ顕微鏡を利用した先端分析技術 (JASISコンファレンス) (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Kawai, O. Krejci, T. Nishiuchi, K. Sahara, T. Kodama, R. Pawlak, E. Meyer, T. Kubo, A. S. Foster
2. 発表標題 Three-dimensional Graphene Nanoribbon as a Playground for Local Probe Chemistry
3. 学会等名 The 22nd International Conference on Non-Contact Atomic Force Microscopy (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川井 茂樹
2. 発表標題 原子間力顕微鏡をもちいた原子レベルでおこなう単分子の構造解析
3. 学会等名 日本顕微鏡学会第75回学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Kawai
2. 発表標題 Structurally defined nanocarbon synthesized by on-surface chemical reaction
3. 学会等名 International Workshop TOPOLOGY: the New Horizon in Materials Science and Nanophotonics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川井 茂樹
2. 発表標題 原子間力顕微鏡を用いた単分子の構造観察と操作
3. 学会等名 分子研研究会「単分子有機化学の挑戦」(招待講演)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究分担者	田原 一邦 (TAHARA Kazukuni) (40432463)	明治大学・理工学部・専任准教授 (32682)	
研究分担者	久保 孝史 (KUBO Takashi) (60324745)	大阪大学・理学研究科・教授 (14401)	

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			
フィンランド	Aalto University			
シンガポール	Nanyang Technological University			
英国	King ' s College London			
フィンランド	Aalto University			
スイス	University of Basel	EMPA		

共同研究相手国	相手方研究機関			
ドイツ	MPIP			