

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02816

研究課題名(和文) 高次アセンの構造物性相関理解の深化と基板上ナノカーボン合成への展開

研究課題名(英文) Understanding of structure-property relationship of polyacenes and its application to on-surface synthesis of nanocarbons

研究代表者

林 宏暢 (Hironobu, Hayashi)

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・主任研究員

研究者番号：00736936

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：ベンゼン環が直線状に連結した高次アセンは、高い電荷輸送特性や基底状態でのビラジカル性など興味深い物性を示すことに加え、ナノカーボン材料作製の前駆体として有用である。本研究では、不安定な高次アセンを単結晶内部や超高真空下などの嫌気条件下で合成する手法を確立し、高次アセンの構造と電子的物性の相関解明に成功した。さらに、超高真空下での昇華・加熱プロセスを必要としない、簡便なグラフェンナノリボン合成の足がかりを築いた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高次アセンの合成法確立と物性相関理解は、次世代デバイスへの応用が期待される有機半導体・ナノカーボン材料を設計する上で有用な知見である。また、高次アセンの基板上合成研究の過程で得られた、高次にpi共役系が拡張された予想外のナノ分子生成の発見は、独自のナノ構造体創成法につながる成果である。また、新しい基板上光反応性の開拓・理解、簡便なプロセスを用いたナノ構造体・ナノカーボン材料構築法の開拓は、従来の手法を用いた研究とは方向性の異なる研究への発展を促すものである。

研究成果の概要(英文)：Polyacenes, which have linearly fused benzene rings, are known to exhibit not only high charge transport properties but also biradical characters in the ground state. Additionally, they are useful as precursors for nanocarbon materials. In this study, we have developed a synthetic method for unstable polyacenes under anaerobic conditions such as interior of a single crystal and ultra-high vacuum conditions, and successfully unveiled the structure-property relationship of polyacenes. Furthermore, we created a “foothold” for the synthesis of graphene nanoribbons in a simple manner that does not require conventional sublimation/heating processes of precursor molecules under ultra-high vacuum conditions.

研究分野：機能材料科学

キーワード：高次アセン 基板上合成 構造物性相関 ナノカーボン グラフェンナノリボン 前駆体 環状分子

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

シリコン半導体を上回る優れた物性を示すグラフェンナノリボン(GNR)に代表されるナノカーボン材料は、半導体に革新をもたらす材料であると認知されている。しかしながら、次世代デバイス¹の基幹材料としての利用には、アームチェア型 GNR ではバンドギャップの小さな幅広 GNR の合成手法確立が、ジグザグ型 GNR では反応性の高いエッジ部位を制御する必要がある。一方、高次アセンはベンゼン環が直線上に連結した構造を有する多環芳香族炭化水素である。高次アセンは単純な構造を有するにも関わらず、アモルファスシリコンに匹敵する優れた電荷輸送特性を示す。さらに、ナノカーボン材料の合成・物性と大きな関連を持つ。例えば、最も幅の狭いジグザグ型 GNR と見なすことができる高次アセンは、ジグザグ型 GNR のエッジ状態や化学的²反応性、電子の構造を理解するモデル系として利用できる。また、バンドギャップの狭いアームチェア型 GNR 合成の鍵化合物と成り得る。実際、これまで高次アセンを前駆体とし、基板上合成と呼ばれる手法を用いて、様々な構造を有する GNR や 2 次元ナノカーボン材料の開発がなされてきた。基板上合成とは、原料となる臭素化分子を金基板上に昇華し、 10^{-8} Pa 程度の超高真空下で加熱することにより、金基板表面の触媒作用を利用した連結・脱水素環化反応を経てナノカーボン材料を合成する手法である。ここで、超高真空下での実験環境は、縮環数が増えるに従い酸化に対して不安定になる高次アセンの合成にも大きな威力を発揮する。これまで研究代表者は、これらの手法を利用して、高次アセンの構造・物性評価、高次アセンを前駆体とするナノカーボン作製を行ってきた。

2. 研究の目的

上記の研究を推進する中で研究代表者は、下記に示す 3 点が革新的ナノカーボン合成法創出に重要な知見を与えると考え、これらの解決を目的に研究を推進した。

(1) 高次アセンの構造・物性相関理解の深化

高次アセンとナノカーボン材料の合成法や構造・物性は大きな相関がある。置換基やヘテロ原子を導入した高次アセンの嫌気条件下(超高真空下・単結晶内部など)での合成法確立と構造物性相関の解明を行い、所望のナノカーボン材料の物性制御や合成法の選択の幅を広げる。

(2) 光反応を利用した基板上ナノカーボン合成の実現

光に対して基板上で反応性を有する高次アセン誘導体の開発により、従来型の加熱ではなく光反応を利用した基板上ナノカーボン合成法を開拓する。

(3) 制約の多い従来型の基板上合成手法からの脱却

従来の基板上合成では試料作製に関する制約が多く、所望の構造・物性を有するナノカーボン材料のテラーメイド合成の実現は遠い。特に、分子の昇華が大前提であることは大きな問題である。本研究では、上記のような制約の少ない、新規基板上合成法を開拓する。

3. 研究の方法

所望の高次アセンやナノカーボン材料を構築可能な原料・前駆体を有機合成し、バルクでの変換反応や基板上合成への展開と連結・変換反応、さらに、得られた分子・ナノ構造体の物性評価を行う。(1)に関し、これまでの研究では、炭素と水素から構成される最も単純な高次アセンのみに焦点が当てられてきた。本研究では、窒素を導入した含窒素高次アセンに着目し、その合成法確立と窒素導入が電子的物性に与える影響を評価した。さらに嫌気条件下として、単結晶内部空間の利用を検討した。(2)に関しては、可視光などの光照射を契機とする構造変換手法の

開拓(縮合・脱離反応やポリマー化反応)のため、基板上合成に特化した光反応性前駆体の利用・合成・反応メカニズム解析を行った。最後に(3)に関しては、バルク合成が可能な液相合成や、ドロップキャストによる Au(111)上への前駆体担持と加熱によるナノ構造体化を検討した。

4. 研究成果

(1) 高次アセンの構造・物性相関理解の深化

不安定な高次アセンの合成と物性評価を行う手段として、最終段階で脱離する置換基を導入した高次アセン前駆体を合成し、嫌気条件下で高次アセンへの変換反応を行うアプローチ(前駆体法)を用いた。本研究で研究代表者は、前駆体法として光照射による α -ジケトン部位の脱離反応や加熱による逆 Diels-Alder 反応を利用し、含窒素高次アセンの合成に挑戦した。

含窒素高次アセン前駆体を作製する上での鍵化合物となるテトラキノンを市販原料から 9 ステップで合成した。このテトラキノンに対し、適切なジアミン誘導体を脱水縮合することで、一連の含窒素高次アセン前駆体(N-7BCOD・N-9BCOD・N-11BCOD)の合成を達成した(図1)。これらの前駆体に関しては単結晶 X 線構造解析にも成功している。ここで、バルク状態での逆 Diels-Alder 反応を調査するため、含窒素高次アセン前駆体の熱重量分析を行った。その結果、N-7BCOD では高温での熱分解が示唆されたが、N-9BCOD では含窒素ノナセンへの変換、N-11BCOD では片方の BCOD 部位のみが逆 Diels-Alder 反応した中間体生成が示唆された。そこで、N-9BCOD の粉末を、クーゲルロールを用いて真空下、375°C で 2 時間加熱した後、質量分析を行った。その結果、 $m/z=482.1527$ のピークが観測され、含窒素ノナセン(計算値 : 482.1526 [M]⁺)の生成を強く支持する結果を得た。

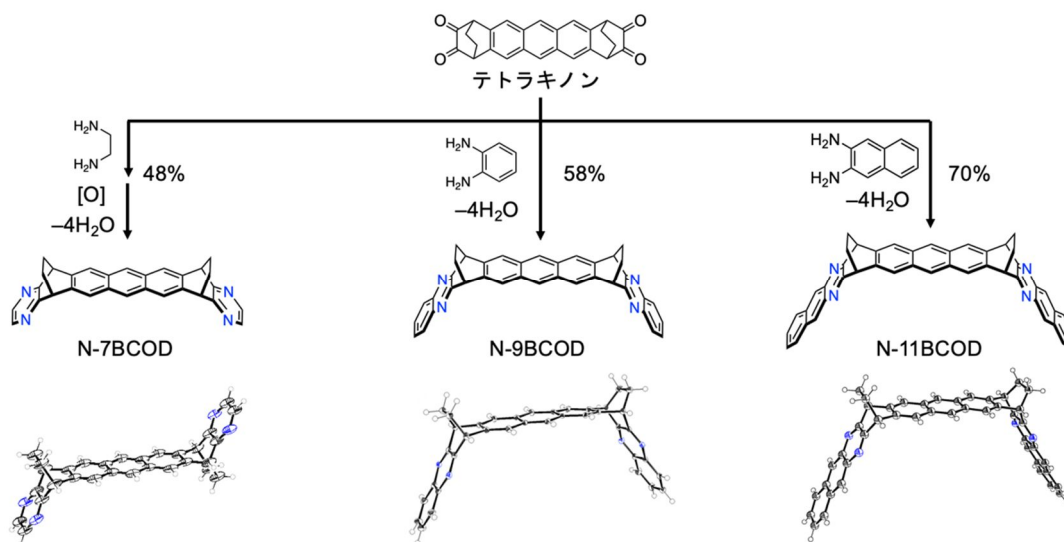


図1 含窒素高次アセン前駆体の合成と単結晶 X 線構造解析

一方、高次アセンは難溶であるため NMR などの帰属が困難であり、その不安定さは物性評価を困難とする。そこで、超高真空下での基板上合成を利用した(図2)。Empa@スイスとの共同研究として、N-11BCOD を Au(111)表面に蒸着し加熱を行ったところ、窒素部位が水素化された含窒素ウンデカセンやピロール環が縮環した構造体が生成物として得られた。特にピロール縮環体生成は、Au(111)基板表面反応では、逆 Diels-Alder 反応によるエチレンの脱離が協奏的でなく段階的に起こっていることを示す。このような予想外の生成物は、表面合成を利用した斬新なナノ構造体の創成につながる成果である。最終的に、N-11BCOD の BCOD 部分を走査型トンネル顕微鏡の Tip 操作により脱離・芳香族化することで、含窒素ウンデカセンの合成に成功した。

さらに、走査トンネル分光法による電子構造評価および量子化学計算を行い、含窒素ウンデカセンが基底状態で開殻シングレット構造であることを実験的に証明した。

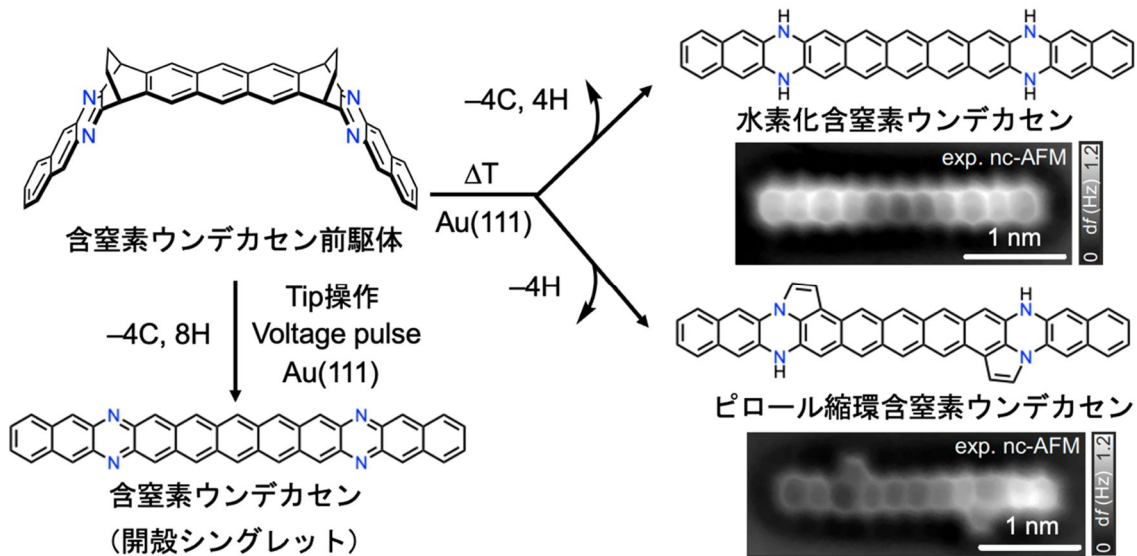


図2 基板上合成を用いた含窒素ウンデカセンおよびその誘導体合成

ここで、含窒素高次アセン前駆体合成の鍵となるテトラケトンと1,2,4,5-テトラアミノベンゼン4塩酸塩を脱水縮合させることで、含窒素シクラセン前駆体である環状分子[3+3]の合成に成功した(図3)。ポリマー生成と競合するため0.8%と低単離収率であるが、[3+3]は逆Diels-Alder反応により含窒素シクラセンへの変換が期待されるため、本環状分子を単離できた意義は大きい。バルク状態での変換反応に加え、含窒素シクラセンの不安定さを考慮し、現在、超高真空下での変換に挑戦中である。

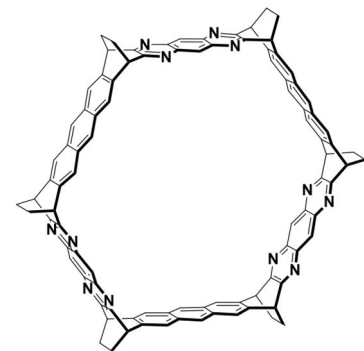


図3 環状分子[3+3]

さらに研究代表者は、基板上合成で得た嫌気条件下での高次アセンの安定性に関する知見を発展させ、単結晶内部が外部空間から隔離された孤立空間であることに着目し、単結晶内部で高次アセン合成を実現した。具体的には、光変換型ヘプタセン前駆体の単結晶を作製し、その内部のみにCWレーザー(470 nm)を照射したところ、脱カルボニル化に伴うヘプタセン生成を示す吸収スペクトル強度が、時間経過とともに増大した(図4)。これは、単結晶内部が孤立空間として機能し、ヘプタセン分解が阻害されたことを支持する。このように本研究では、前駆体法と嫌気条件下での変換反応を組み合わせた高次アセンの合成手法を開拓し、その構造・物性相関理解につなげることができた。

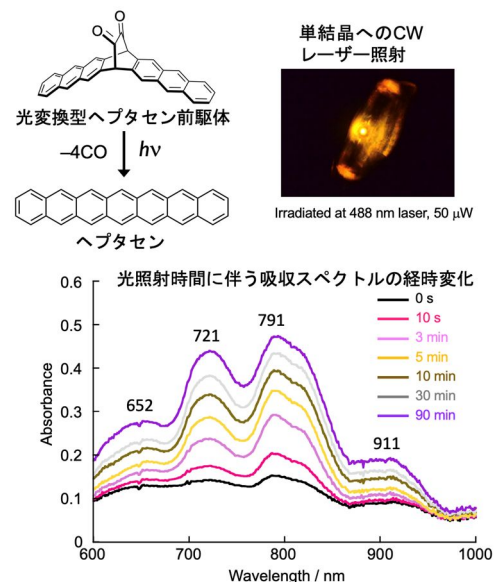


図4 単結晶内部でのヘプタセン生成

(2) 光反応を利用した基板上ナノカーボン合成の実現

IMDEA@スペインとの共同研究として、Ru(0001)上にエピタキシャル成長したグラフェン上に光変換型ノナセン前駆体を堆積させ、光照射を行った。その結果、極めて高い反応収率(~100%)

でノナセンに変換されることを見出した。これは、Au(111)表面上での光変換型ノナセン前駆体の光変換反応の収率が約 80%に留まっていたことと対照的である。種々解析の結果、グラフェンと Ru(0001)との相互作用によるジケトンの n-pi*遷移とエネルギー的に一致する表面共鳴効果の発生が、変換効率向上に寄与していることが分かった。今後、この成果を展開した、光照射を鍵とする基板上合成を用いた高次ナノ構造体形成の効率的合成が期待される。

また、研究代表者は、固相や液相では光照射に不活性な置換基が、単結晶金属表面上では効率良く脱離することを見出している。本研究ではさらに様々な置換基を有する高次アセン誘導体（前駆体）を合成し、Au(111)上への蒸着・光照射を行うことで、どのような置換基が Au(111)上での光照射に活性なのかを調査した。その結果、「硬い骨格」は比較的活性が低いことが分かったが、一般性の発見や反応メカニズム解析には、今後より多くの骨格・構造に対して実験を行う必要がある。得られた結果をもとに反応性のライブラリー構築ができれば、独自の基板上ナノカーボン材料創成技術に直結すると考える。

(3) 制約の多い従来型の基板上合成手法からの脱却

Au(111)の触媒作用とドロップキャスト法による基板上への担持を組み合わせた、簡便な基板上合成法の開拓を目指した。具体的には、ジプロモアントラセンダイマー（DBBA）の THF 溶液を Au(111)表面にドロップキャストした。次に、低真空下または Ar 雰囲気下で基板を加熱（200℃、1時間）することで、DBBA のポリマー形成を試みた。室温まで冷却後、Au(111)表面をジクロロメタンで洗浄し、その洗浄液の質量分析を行った。低真空下で加熱した系では、おそらく原料の昇華により、加熱後は原料・反応物の質量ピークともに全く観測されなかった。

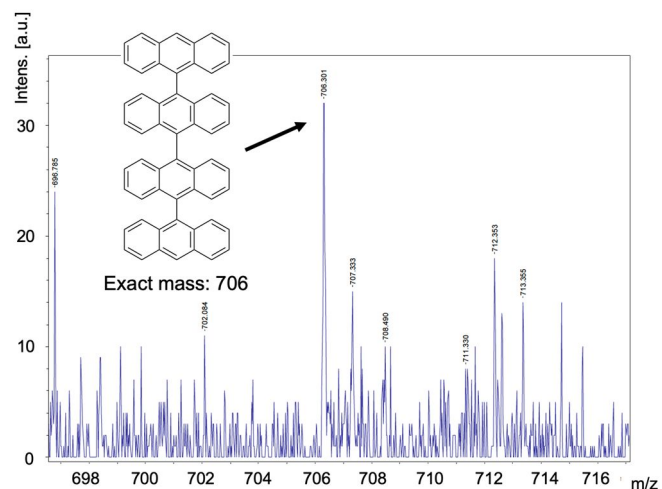


図5 Ar 雰囲気下、200℃で1時間加熱を行った後の生成物の質量分析結果

一方、Ar 雰囲気下での加熱では、質量分析の結果、原料のピークに加えて、脱プロモ化・ラジカル重合を経て、2量化したピークが検出された（図5）。現時点では3量体が生成しているかどうかの判別はできなかった。今後、加熱後の基板を走査型トンネル電子顕微鏡による直接観測や、ドロップキャストの濃度や加熱条件の最適化を行うことで、ポリマー・GNR 生成が実現できると期待される。

さらに研究代表者は、簡便かつ大量合成可能な GNR 合成法開拓として、エッジに部分的にフッ素が導入された GNR の液相合成を試みた。GNR 前駆体であるポリマーを有機合成し質量分析を行ったところ、最大 3.5 nm 程度の長さを持つポリマー（9量体）形成が示唆された。次に、GPC による分離・酸化反応を経た後、得られた黒色沈殿のラマンスペクトルを測定したところ、GNR 由来と思われる G band、D band および RBLM ピークが観測された。今度、ポリマー生成条件の最適化や酸化反応条件検討により、フッ素修飾 GNR の大量合成が期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 17件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Zhu Juanjuan, Hayashi Hironobu, Chen Meng, Xiao Chengyi, Matsuo Kyohei, Aratani Naoki, Zhang Lei, Yamada Hiroko	4. 巻 -
2. 論文標題 Synthesis and Evaluation of Charge Transport Property of Ethynylene Bridged Anthracene Oligomers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Macromolecular Chemistry and Physics	6. 最初と最後の頁 2100024 ~ 2100024
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/macp.202100024	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 Hayashi Hironobu, Hieda Nao, Yamauchi Mitsuaki, Chan Yee Seng, Aratani Naoki, Masuo Sadahiro, Yamada Hiroko	4. 巻 26
2. 論文標題 Visible Light Induced Heptacene Generation under Ambient Conditions: Utilization of Single crystal Interior as an Isolated Reaction Site	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemistry - A European Journal	6. 最初と最後の頁 15079 ~ 15083
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/chem.202002155	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 Ayani Cosme G., Pisarra Michele, Urgel Jose I., Navarro Juan Jesus, Diaz Cristina, Hayashi Hironobu, Yamada Hiroko, Calleja Fabian, Miranda Rodolfo, Fasel Roman, Martin Fernando, Vazquez de Parga Amadeo L.	4. 巻 6
2. 論文標題 Efficient photogeneration of nonacene on nanostructured graphene	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nanoscale Horizons	6. 最初と最後の頁 744 ~ 750
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D1NH00184A	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 Zhu Juanjuan, Hayashi Hironobu, Chen Meng, Xiao Chengyi, Matsuo Kyohei, Aratani Naoki, Zhang Lei, Yamada Hiroko	4. 巻 10
2. 論文標題 Single crystal field-effect transistor of tetrabenzoporphyrin with a one-dimensionally extended columnar packing motif exhibiting efficient charge transport properties	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Materials Chemistry C	6. 最初と最後の頁 2527 ~ 2531
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d1tc03547a	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 Ohtomo Manabu, Hayashi Hironobu, Shiotari Akitoshi, Kawamura Mayu, Hayashi Ryunosuke, Jippo Hideyuki, Yamaguchi Junichi, Ohfuchi Mari, Aratani Naoki, Sugimoto Yoshiaki, Yamada Hiroko, Sato Shintaro	4. 巻 4
2. 論文標題 On-surface synthesis of hydroxy-functionalized graphene nanoribbons through deprotection of methylenedioxy groups	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nanoscale Advances	6. 最初と最後の頁 4871 ~ 4879
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d2na00031h	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 Eimre Kristjan, Urgel Jose I., Hayashi Hironobu, Di Giovannantonio Marco, Ruffieux Pascal, Sato Shizuka, Otomo Satoru, Chan Yee Seng, Aratani Naoki, Passerone Daniele, Groning Oliver, Yamada Hiroko, Fasel Roman, Pignedoli Carlo A.	4. 巻 13
2. 論文標題 On-surface synthesis and characterization of nitrogen-substituted undecacenes	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 511
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-022-27961-1	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 Chan Yee Seng, Hayashi Hironobu, Sato Shizuka, Kasahara Shoma, Matsuo Kyohei, Aratani Naoki, Yamada Hiroko	4. 巻 2022
2. 論文標題 Polyazaacene and Cyclazaacene Precursors Synthesized by Dehydration Condensation from a Versatile Bis α diketone Unit Having an Anthracene Skeleton	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 European Journal of Organic Chemistry	6. 最初と最後の頁 e202200621
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/ejoc.202200621	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 Uehara Keiji, Kano Haruka, Matsuo Kyohei, Hayashi Hironobu, Fujiki Michiya, Yamada Hiroko, Aratani Naoki	4. 巻 5
2. 論文標題 Mirror Image Cofacial Coronene Dimers Characterized by CD and CPL Spectroscopy: A Twisted Bilayer Nanographene	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ChemPhotoChem	6. 最初と最後の頁 974 ~ 978
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/cptc.202100166	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 Sugano Yuki, Matsuo Kyohei, Hayashi Hironobu, Aratani Naoki, Yamada Hiroko	4. 巻 25
2. 論文標題 Synthesis of 10,20-substituted tetrabenzo-5,15-diazaporphyrin copper complexes from soluble precursors	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Porphyrins and Phthalocyanines	6. 最初と最後の頁 1186 ~ 1192
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S1088424621501194	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 Kano Haruka, Matsuo Kyohei, Hayashi Hironobu, Kato Kosaku, Yamakata Akira, Yamada Hiroko, Aratani Naoki	4. 巻 2021
2. 論文標題 Buckyball as an Electron Donor in a Dyad of C60 and Xanthene Dye	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 European Journal of Organic Chemistry	6. 最初と最後の頁 3377 ~ 3381
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/ejoc.202100276	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 Kano Haruka, Hayashi Hironobu, Matsuo Kyohei, Fujiki Michiya, Yamada Hiroko, Aratani Naoki	4. 巻 11
2. 論文標題 Deep-red circularly polarised luminescent C70 derivatives	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 12072
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-91451-5	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 Sugano Yuki, Matsuo Kyohei, Hayashi Hironobu, Aratani Naoki, Yamada Hiroko	4. 巻 27
2. 論文標題 Synthesis and properties of 10,20-bis(triisopropylsilylethynyl)-tetrabenzo-5,15-diazaporphine	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Porphyrins and Phthalocyanines	6. 最初と最後の頁 A-1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S1088424622500766	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 Kurosaki Ryo, Morimoto Hirofumi, Matsuo Kyohei, Hayashi Hironobu, Yamada Hiroko, Aratani Naoki	4. 巻 29
2. 論文標題 An Atropisomerism Study of Large Cycloarylenes: [n]Cyclo 4,10 Pyrenylenes' Case	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Chemistry - A European Journal	6. 最初と最後の頁 e202203848
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/chem.202203848	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 Fujita Ryuichi, Yoshida Shoko, Kano Haruka, Matsuo Kyohei, Hayashi Hironobu, Yamada Hiroko, Aratani Naoki	4. 巻 41
2. 論文標題 A Series of Soluble Planar Oligorylenes up to Hexarylene	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Chinese Journal of Chemistry	6. 最初と最後の頁 1023 ~ 1027
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/cjoc.202200692	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 Matsuo Kyohei, Okumura Rina, Hayashi Hironobu, Aratani Naoki, Jinnai Seihou, Ie Yutaka, Saeki Akinori, Yamada Hiroko	4. 巻 58
2. 論文標題 Phosphaacene as a structural analogue of thienoacenes for organic semiconductors	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Chemical Communications	6. 最初と最後の頁 13576 ~ 13579
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d2cc05122b	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 Yamada Hiroko, Hayashi Hironobu	4. 巻 21
2. 論文標題 Synthesis of oligoacenes using precursors for evaluation of their electronic structures	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Photochemical & Photobiological Sciences	6. 最初と最後の頁 1511 ~ 1532
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s43630-022-00235-x	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 Morimoto Hirofumi、Matsuo Kyohei、Hayashi Hironobu、Yamada Hiroko、Aratani Naoki	4. 巻 51
2. 論文標題 Facile Post-synthesis and Redox Behavior of -Expanded Ferrocene and ansa-Ferrocene	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 428 ~ 430
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/cl.220011	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18件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 林宏暢
2. 発表標題 前駆体法を用いた高次アセン合成と機能性材料創出への展開
3. 学会等名 ACE Meeting Online II (招待講演)
4. 発表年 2020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

1. 発表者名 加納春華、林宏暢、松尾恭平、藤木道也、山田容子、荒谷直樹
2. 発表標題 新規キラルフラレン合成法の開拓とキロプティカル特性
3. 学会等名 基礎有機化学討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 方 涛, 塩谷 暢貴, 富田 和孝, 吉田 茉莉子, 下赤 卓史, 林 宏暢, 山田 容子, 長谷川 健
2. 発表標題 ペンタセン前駆体が薄膜中で示す光転化反応の解析
3. 学会等名 第69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 笠原 彰真, 林 宏暢, 荒谷 直樹, 山田 容子
2. 発表標題 脱水縮合反応を用いたベルト型環状分子の合成
3. 学会等名 日本化学会 第102春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岸本 太地, 林 宏暢, 荒谷 直樹, 山田 容子
2. 発表標題 フッ素修飾グラフェンナノリボンの部分構造合成
3. 学会等名 日本化学会 第102春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 南野 直人, 林 宏暢, 荒谷 直樹, 山田 容子
2. 発表標題 エチレン架橋されたアセン多量体の合成：ワンポット合成と多段階合成
3. 学会等名 日本化学会 第102春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 林 宏暢、山田 容子
2. 発表標題 基板上合成を用いた含窒素ウンデカセンとその誘導体の合成
3. 学会等名 日本化学会 第102春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hironobu Hayashi, Hiroko Yamada
2. 発表標題 On-surface synthesis and characterization of tetraazaundecacene and its derivatives
3. 学会等名 第63回 フラーレン・ナノチューブ・グラフェン 総合シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 笠原彰真、林 宏暢、荒谷 直樹、山田 容子
2. 発表標題 可逆的ボロン酸エステル形成を利用した環状分子の合成：異性体の分離効果
3. 学会等名 第32回基礎有機化学討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 南野直人、林宏暢、荒谷直樹、山田容子
2. 発表標題 ジケトンとジアミンとの脱水縮合反応を用いた大環状分子の合成
3. 学会等名 第32回基礎有機化学討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 林 宏暢、Zhu Juanjuan、松尾 恭平、荒谷 直樹、山田 容子
2. 発表標題 高効率な電荷輸送特性を示す一次元カラム構造を形成したテトラベンゾポルフィリンの単結晶電界効果トランジスタ
3. 学会等名 日本化学会第103春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山本 築、林 宏暢、松尾恭平、荒谷 直樹、山田 容子
2. 発表標題 トリプチセン誘導体を利用したポーラスナノシートの合成
3. 学会等名 日本化学会第103春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 笠原 彰真・林 宏暢・大伴 真名歩・松尾 恭平・荒谷 直樹・佐藤 信太郎・山田 容子
2. 発表標題 5,11-ジアントリル-アントラジチオフエンを用いた表面化学ポリマー合成
3. 学会等名 日本化学会第103春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yee Seng CHAN, Hironobu Hayashi, Naoki Aratani, Hiroko Yamada
2. 発表標題 Polyazaacenes Generation by Using Precursor Methods
3. 学会等名 241st ECS Meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hironobu Hayashi, Junichi Yamaguchi, Takayuki Okumura, Daichi Kishimoto, Hideyuki Jippo, Kyohei Matsuo, Naoki Aratani, Mari Ohfuchi, Sintaro Sato, Hiroko Yamada
2. 発表標題 On-surface synthesis of armchair-type graphene nanoribbons by using p-dihalobenzene-based precursors
3. 学会等名 International Workshop On-Surface Synthesis (OSS22) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hironobu Hayashi
2. 発表標題 Synthesis of Oligoacenes as Ladder-Type pi-Conjugated Molecules
3. 学会等名 The 2nd Workshop on Ladder Polymer Science (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hironobu Hayashi, Hiroko Yamada
2. 発表標題 Polyazaacene and cyclazaacene precursor synthesis
3. 学会等名 11th singapore international chemical conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Hironobu Hayashi, Hiroko Yamada	4. 発行年 2023年
2. 出版社 Wiley Online Library	5. 総ページ数 24
3. 書名 Atomically Precise Nanochemistry	

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----

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			
スペイン	Universidad Autonoma de Madrid	IMDEA-Nanociencia		
中国	北京化工大学			
スイス	Empa			