

令和 3 年 5 月 14 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2015～2019

課題番号：15H05754

研究課題名(和文) 活性炭素クラスター集積体の階層的次元制御と機能発現

研究課題名(英文) Hierarchical Control of Carbon Cluster Organization and Their Function

研究代表者

中村 栄一 (Nakamura, Eiichi)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・特任教授

研究者番号：00134809

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 126,600,000円

研究成果の概要(和文)：光電子物性や生物活性発現に関わる有機小分子の設計・合成とそのクラスター集積体の階層的次元制御を行い機能の発現を目指した。その結果、鉄触媒を用いたCH活性化による芳香族化合物の新規合成法、新規両親媒性フラレン分子による界面制御、平面性 共役分子の集合や相互作用を活かした分子ワイヤ、有機固体レーザー、siRNAの臓器選択的な輸送など、有機エレクトロニクス、フォトニクス、医学研究の発展に資する新物質とその集合体を作り出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、分子設計と合成というゼロ次元の有機化学を基盤に、液相、固相、中間相での単一または複数種類の分子や粒子の3次元制御により、物性・デバイス機能、生物活性の分野に展開した。フラレン、ポルフィリン、架橋共役系などの活性炭素クラスター化合物群を用いて、化学、医学、電子電気工学、顕微鏡科学にわたる広い境界領域分野を包含する研究を遂行する中で、日本および世界の未来を担う研究者、教育者を育成できた。

研究成果の概要(英文)：Structure determination, design/synthesis of molecules, and space temporal control of molecular events represent the modern paradigm of organic chemistry. This project has focused on the hierarchical control of the solution and solid-state chemistry including time evolution of the structures of molecules and molecular assemblies. In doing so, we focused on the diverse functional activities of carbon cluster compounds possessing pi-conjugated systems, deepened our understanding of space temporal control, and developed biomedical and industrial applications. We have synthesized conical fullerene amphiphiles, and applied them for solubilization of nanoparticles, and for delivery of siRNA to kidney through a blood stream. We discovered that dissolution of tetrabenzoporphyrin in an organic acid results in precipitation of entangle fibers, a molecular wire showing a ON/OFF switching ratio of 2700.

研究分野：物理有機化学、有機合成化学、有機エレクトロニクス

キーワード：電子系 フラレン 分子ワイヤ 有機レーザー 非晶質粒子

1. 研究開始当初の背景

分子構造の分析と設計・合成は有機化学研究の古典的パラダイムである。しかし有機化学研究の領域が大きく広がった今日、分子設計・合成だけではなく、原子や分子の集合体とその時空間展開の制御が必須となった。有機化学研究の枠組みを超えた新しい学術的課題であると同時に、実社会の課題とも直結した課題でもある。

2. 研究の目的

本研究は、光電子物性や生物活性発現に関わる有機小分子の設計・合成と分子集積体の階層的次元制御を行い、新機能の発現を目指す。具体的には、フラーレンや平面型 π 共役分子のような炭素クラスター化合物群の持つ多彩な機能に着目し、それらの分子の集積体の挙動の一、二、三次元構造およびその時間展開に関する理解を深め、基礎科学のみならず、関連分野の未来を切り開く基盤を提供する。

3. 研究の方法

本研究では、分子設計と合成というゼロ次元の有機化学を基盤に、液相、固相、中間相での単一または複数種類の分子や粒子を研究することで、物性・デバイス機能、生物活性で新展開を図る。フラーレン、ポルフィリン、架橋共役系などの活性炭素クラスター化合物群は、自身の構造変化に伴うエントロピー変化が少なく安定な集合体を形成する分子群であり、その化学、物理、生物学的機能を探索する。本研究は学術および実用面に多様な広がりを持っていることから、国内外の9カ所に及ぶ研究グループと共同研究を行って、以下の述べる成果を挙げた。

4. 研究成果

本研究は、液相、固相、中間相での単一または複数種類の分子の集積体の構造と機能に注目し、ナノ科学、材料・生物機能などに波及効果を持つ知見を得た。以下に代表的成果を記す。

(1) 両親媒性フラーレン集積体の新機能

フラーレンは通常の有機分子では実現不可能な1ナノもの大きさを持つ完全剛直な疎水性分子である。研究代表者は、円錐の中にアニオン部分を持つCFA1が水中で集合してフラーレンベシクルを形成することを2001年に報告したが、本研究ではCFAが、水中で、これまでの脂質膜には見られなかった多様な機能を持つことを発見した。

①CFAの特異的な界面活性:円錐状と棒状フラーレン両親媒性分子の水中での集合挙動に関して、構造活性相関を検討し、イオン性水溶性基を持つ分子は空気-水、有機溶媒-水の界面活性を全く示さない代わりに極めて低濃度でミセルを形成し、構造を少し変えるとすべての分子がミセルないしヘミミセルに集合することが分かった。その高い固体親和力を活かして、カーボンナノチューブや磁性ナノ粒子を水に可溶化した。

②siRNAとCFAの結合・解離機構:既報のアミノCFAによる、siRNAのマウスにおける敗血症の予防機能の発現の作用機作を解明すべく、アミノCFAの血清中での集合とsiRNAとの結合・解離に関して電子顕微鏡および生物学的手法を用いて検討したところ、CFA、siRNA、アルブミン間のミクロン単位の3体集積体が形成、それが固体に触れると解離分解することが分かった。毛細血管内*in vivo*で見られた現象と良い一致を示す。本siRNAデリバリー手法の一般性を確認する目的で、マウスで糸球体足細胞の遺伝子のノックアウトを検討したところ、腎機能の変化を確認した。CFA型siRNA導入薬は細胞毒性が極めて低く且つヌクレオシドのサイズや構造に応じて添加比率を変えることで導入効率を最適化できる処方柔軟性があることが証明できた。この知見を活用して、siRNA導入の難易度の高い腎臓糸球体に固有な上皮細胞への導入を達成した。

③金ナノ粒子プラズモニックナノ構造と触媒機能:本ベシクル疎水性界面において界面活性修飾を施した金ナノ粒子が協同的自己集積できることを見出し、30ナノメートル径の有機無機ハイブリッドベシクルを得ることに成功した。集積化した金ナノ粒子は粒子単独の場合よりも高い還元反応触媒活性を示し、さらに粒子径を成長させることで金粒子のプラズモンカップリングを誘起し、緑色光により発熱してベシクルを破壊することも明らかにした。

④テンプレート重合によるポリマー形態制御:堅固なフラーレン二重膜構造を重合反応テンプレートとして用い、オレフィン単量体を膜にドープさせてオレフィンメタセシス重合させ、二重膜の球形を反映したカプセル状の直径数10nmの官能基化されたポリマー集積体を形成できた。

⑤フラーレンベシクルの構造と水透過:研究代表者は光散乱法によって、両親媒性フラーレンが二重膜ベシクルを形成することを報告し、その後上記の例に様々な手法を用いてその構造と性質の検討を進めてきたが、二重膜の内部構造に関する情報を得ることは出来なかった。本研究では中性子散乱法を用いて、多層構造を持っていることを明らかにした。また重水の拡散速度を調べたところ、脂質二重膜の百万分の一程度という極めて小さな水透過性を示す極めて特殊な自己集合膜であることが分かった。

⑥非晶質球形粒子の生成：有機結晶の生成過程は、非晶質集積体生成と引き続く内部分子の構造再配列による結晶核形成の二段階で進む。そこで構造再配列以前に、急速に粒子サイズを増加させれば、非晶質粒子を形成できると予測して検討した結果、フォルモテロールのような医薬化合物から有機フラーレンに至るまでの幅広い結晶性物質を、完全球形をした直径50 nmから1ミクロン程度の非晶質粒子として得た。有機固体の新成形成法として工業的応用の可能性を企業と共同で探索している。

(2) 平面共役系集積体のデバイス機能

①酸性度でスイッチする一次元結晶ナノワイヤ：有機分子の結晶成長機構の検討の過程で、テトラベンゾポルフィリン (BP) 分子を有機酸に溶解すると二プロトン化体を経て生成したラジカルカチオンに中性分子がスタックし、マイクロスケールの一次元結晶が生成した。このワイヤは最高1900S/mという有機半導体としては最高レベルの導電性を示し、かつその導電性は用いる酸の pK_a に比例関係を示す。内部の酸をアミンで中和するとON/OFF比最大2700で、導電性を可逆的にスイッチングできることが分かった。

②長寿命波長可変固体色素レーザー発光：COPV1-6 が光照射に強くかつ電子伝導性安定な色素であることに着目して、有機固体中に埋包して有機固体レーザー発振特性をスペインの Maria Diaz 教授との共同研究で検討した。既知の色素に比べて誘導放出係数および安定性が大幅に高いばかりでなく、COPV1-6 の分子長に合わせた適切な固体薄膜導波路の形成により、低閾値の分布帰還型 (DFB) 固体レーザーデバイスを作製できた。また COPV 分子内での電荷・スピントランスファーが分子全体に渡って起きることを明らかにした。

③COPV 重合体の合成：COPV の特徴は分子構造のデザイン性と安定性である。この特徴を活かしてドナーアクセプター型の COPV ポリマーを合成し、その吸収発光特性およびレーザー発光と電気的特性を評価した。その結果、ポリマー化することにより、対応するモノマーよりも一桁以上高い安定性を達成できることが分かった。

④室温で機能するCOPV単分子有機ナノワイヤ：東工大真島豊教授の開発した自己触媒型無電解金メッキナノギャップにCOPV6のジチオール体を挟んだデバイスにおいて、典型的なコヒーレント共鳴トンネルダイオード特性を得た。この特性が極低温の9Kのみならず300Kでも得られたこと、さらに3ヶ月空気中室温で保存した後も全く同じ特性が得られたことは、COPV分子の高い剛直性を反映したものであり、有機ナノワイヤによる分子素子創成への一つの障壁、安定性の障壁を乗り越えたことになる。

(3) 平面共役系合成のための新手法開拓

① π 共役分子のde novo設計と新規合成法開拓：本研究の要はde novo分子設計とそれを可能とする新規合成手法の開拓である。平面共役系分子の新しい形として、平面共役複素環 (ベンゾジピロール、BPD) の有機部分に二つのスルホン酸ナトリウム塩を組みこんだ分子BDPSOを合成したところ、ペロブスカイトの結晶成長の制御により、安定にして均一な高効率正孔輸送膜を調製することができた。これを用いて、鉛ペロブスカイト太陽電池の安定的発電を実現した。

② 鉄触媒を用いたホモカップリング副反応を伴わないCH活性反応：本来不活性な芳香環上のCH結合を選択的に活性化して次なる結合生成に活用する反応は、有機合成全体の合成戦略を大きく簡略出来るための注目を集めてきた。研究代表者は、2008年にこの反応を毒性がなく安価な鉄触媒を用いて達成できることを世界に先駆けて発見した。本研究では二つの異なる反応パートナーを、ホモカップリング副反応を完全に抑制しながら、一段階高収率で達成する反応を開拓し、有機電子材料を念頭に置いて、合成を温和な条件下で達成した。

以上纏めると、本研究は新しい有機合成の手法開発と化学反応機構解明を基盤にして、光電子物性や生物活性を示す分子の合成およびそのクラスター集積体の階層的次元制御を行い、太陽電池、レーザー発光、siRNAのin vivo機能発現など、基礎科学のみならず、関連分野の未来を切り開く研究基盤を提供することが出来た。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計40件（うち査読付論文 40件 / うち国際共著 12件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 H. Nishioka, H. Tsuji, E. Nakamura	4. 巻 51
2. 論文標題 Homo- and Copolymers Based on Carbon-Bridged Oligo(p-phenylenevinylene)s for Efficient Fluorescence over the Entire Visible Region	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Macromolecules	6. 最初と最後の頁 2961-2968
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.macromol.8b00102	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 R. Shang, Z. Zhou, H. Nishioka, H. Halim, S. Furukawa, I. Takei, N. Ninomiya, E. Nakamura	4. 巻 140
2. 論文標題 Disodium Benzodipyrrole Sulfonate as Neutral Hole-Transporting Materials for Perovskite Solar Cells	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 J. Am. Chem. Soc.	6. 最初と最後の頁 5018-5022
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.8b01783	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 M. Morales-Vidal, J. A. Quintana, J. M. Villavilla, P. G. Boj, H. Nishioka, H. Tsuji, E. Nakamura, G. L. Whitworth, G. A. Turnbull, I. D. W. Samuel, M. A. Diaz-Garcia	4. 巻 6
2. 論文標題 Carbon-Bridged p-Phenylenevinylene Polymer for High-Performance Solution-Processed Distributed Feedback Lasers	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Adv. Opt. Mater.	6. 最初と最後の頁 1800069
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adom.201800069	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 L. Ilies, Y. Arslanoglu, T. Matsubara, E. Nakamura	4. 巻 7
2. 論文標題 Iron-Catalyzed Synthesis of Indenones through Cyclization of Carboxamides with Alkynes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Asian J. Org. Chem.	6. 最初と最後の頁 1327-1329
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/ajoc.201800200	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 T. Yoshida, L. Ilies, E. Nakamura	4. 巻 20
2. 論文標題 Silylation of Aryl Halides with Monoorganosilanes Activated by Lithium Alkoxide	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Org. Lett.	6. 最初と最後の頁 2844-2847
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.orglett.8b00818	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 C. Ouyang, K. Hashimoto, H. Tsuji, E. Nakamura, Y. Majima	4. 巻 3
2. 論文標題 Coherent Resonant Electron Tunneling at 9 and 300 K through a 4.5 nm Long, Rigid, Planar Organic Molecular Wire	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ACS Omega	6. 最初と最後の頁 5125-5130
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsomega.8b00559	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 D. Okada, S. Azzini, H. Nishioka, A. Ichimura, H. Tsuji, E. Nakamura, F. Sasaki, C. Genet, T. W. Ebbesen, Y. Yamamoto	4. 巻 18
2. 論文標題 -Electronic Cocrystal Microcavities with Selective Vibronic-Mode Light Amplification: Toward FRET Lasing	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nano Lett.	6. 最初と最後の頁 4396-4402
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.8b01442	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 W. Abuillean, A. S. Becker, B. Deme, T. Homma, H. Isobe, K. Harano, E. Nakamura, M. Tanaka	4. 巻 140
2. 論文標題 Neutron Scattering Reveals Water Confined in a Watertight Bilayer Vesicle, W. Abuillean	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 J. Am. Chem. Soc.	6. 最初と最後の頁 11261-11266
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.8b04066	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 S. Nishiguchi, T. Izumi, T. Kouno, J. Sukegawa, L. Ilies, E. Nakamura	4. 巻 8
2. 論文標題 Synthesis of Eesomeprazole and Related Proton Pump Inhibitors through Iron-Catalyzed Enantioselective Sulfoxidation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ACS Catal.	6. 最初と最後の頁 9738-9743
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acscatal.8b02610	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 L. Ilies, Y. Zhou, H. Yang, T. Matsubara, R. Shang, E. Nakamura	4. 巻 8
2. 論文標題 Iron-Catalyzed Directed Alkylation of Carboxamides with Olefins via a Carbometalation Pathway	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ACS Catal.	6. 最初と最後の頁 11478-11482
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acscatal.8b03967	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. Tsuji, A. Ichimura, M. Kudo, J. Sukegawa, E. Nakamura	4. 巻 14
2. 論文標題 Carbon-bridged Oligo(phenylenevinylene)s as Light-harvesting Antenna for Porphyrins	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Chem. Asian. J.	6. 最初と最後の頁 1672-1675
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/asia.201801715	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 Takahiro Doba, Tatsuaki Matsubara, Laurean Ilies, Rui Shang & Eiichi Nakamura	4. 巻 2
2. 論文標題 Homocoupling-free Iron-catalysed Twofold C-H Activation/Cross-couplings of Aromatics via Transient Connection of Reactants	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nat. Catal.	6. 最初と最後の頁 400-406
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41929-019-0245-3	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 Z. Zhou, Z. Qiang, T. Sakamaki, I. Takei, R. Shang, E. Nakamura	4. 巻 11
2. 論文標題 Organic/Inorganic Hybrid p-Type Semiconductor Doping Affords Hole-Transporting-Layer-Free Thin-film Perovskite Solar Cells with High Stability	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Appl. Mater. Interfaces	6. 最初と最後の頁 22603-22611
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsami.9b06513	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 K. Liu, Y. Jiang, Y. Jiang, Y. Guo, Y. Liu, E. Nakamura	4. 巻 141
2. 論文標題 Chemical Formation and Multiple Applications of Organic - Inorganic Hybrid Perovskite Materials	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J. Am. Chem. Soc.	6. 最初と最後の頁 1406-1414
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.8b09532	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 E. Nakamura, K. Harano	4. 巻 52
2. 論文標題 Interfacial Chemistry of Conical Fullerene Amphiphiles in Water	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Acc. Chem. Res.	6. 最初と最後の頁 2090-2100
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.accounts.9b00318	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 T. Sato, T. Yoshida, H. H. Al Mamari, L. Ilies, E. Nakamura	4. 巻 19
2. 論文標題 Manganese-Catalyzed Directed Methylation of C(sp ²)-H Bonds at 25 °C with High Catalytic Turnover	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Org. Lett.	6. 最初と最後の頁 5458-5461
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.orglett.7b02778	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 Y. Guo, W. Sato, K. Shoyama, H. Halim, Y. Itabashi, R. Shang, E. Nakamura	4. 巻 139
2. 論文標題 Citric Acid Modulated Growth of Oriented Lead Perovskite Crystals for Efficient Solar Cells	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 J. Am. Chem. Soc.	6. 最初と最後の頁 9598-9604
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.7b03856	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 L. Schweighauser, K. Harano, E. Nakamura	4. 巻 84
2. 論文標題 Experimental Study on Interconversion between Cubic MOF-5 and Square MOF-2 Arrays	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Inorg. Chem. Commun.	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.inoche.2017.07.009	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 J. A. Quintana, J. M. Villalvilla, M. Morales-Vidal, P. G. Boj, X. Zhu, N. Ruangsupapichat, H. Tsuji, E. Nakamura, M. A. Diaz-Garcia	4. 巻 5
2. 論文標題 An Efficient and Color-Tunable Solution-Processed Organic Thin-Film Laser with a Polymeric Top-Layer Resonator	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Adv. Opt. Mater.	6. 最初と最後の頁 1700238
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adom.201700238	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 K. Shoyama, W. Sato, Y. Guo, E. Nakamura	4. 巻 5
2. 論文標題 Effects of Water on the Forward and Backward Conversions of Lead(II) Iodide to Methylammonium Lead Perovskite	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Mater. Chem. A,	6. 最初と最後の頁 23815-23821
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C7TA08042E	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 B. Zhou, H. Sato, L. Ilies, E. Nakamura	4. 巻 8
2. 論文標題 Iron-Catalyzed Remote Arylation of Aliphatic C-H Bond via 1,5-Hydrogen Shift	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ACS Catal.	6. 最初と最後の頁 8-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acscatal.7b03458	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 H. Hamada, H. Tsuji, E. Nakamura	4. 巻 2
2. 論文標題 Aggregation-responsive ON-OFF-ON fluorescence-switching behaviour of twisted tetrakis(benzo[b]furyl)ethene made by hafnium-mediated McMurry coupling	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Mater. Chem. Front.	6. 最初と最後の頁 296-299
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C7QM00453B	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 Y. Zhen, K. Inoue, Z. Wang, T. Kusamoto, K. Nakabayashi, S. Ohkoshi, W. Hu, Y. Guo, K. Harano, E. Nakamura	4. 巻 140
2. 論文標題 Acid-Responsive Conductive Nanofiber of Tetrabenzoporphyrin Made by Solution Processing	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 J. Am. Chem. Soc.	6. 最初と最後の頁 62-65
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.7b10575	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 K. Minami, K. Okamoto, K. Harano, E. Noiri, E. Nakamura	4. 巻 10
2. 論文標題 Hierarchical Assembly of siRNA with Tetraamino Fullerene in Physiological Conditions for Efficient Internalization into Cells and Knockdown	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ACS Appl. Mater. Interfaces	6. 最初と最後の頁 19347-19354
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acscami.8b01869	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 Y. Guo, K. Shoyama, W. Sato, E. Nakamura	4. 巻 6
2. 論文標題 Polymer Stabilization of Lead(II) Perovskite Cubic Nanocrystals for Semitransparent Solar Cells	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Adv. Energy Mater.	6. 最初と最後の頁 1502317
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/aenm.201502317	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 Y. Guo, W. Sato, K. Shoyama, E. Nakamura	4. 巻 138
2. 論文標題 Sulfamic-Acid Catalyzed Lead Perovskite Formation for Solar Cell Fabrication on Glass or Plastic Substrate	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 J. Am. Chem. Soc.	6. 最初と最後の頁 5410-5416
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.6b02130	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 Q. Yan, Y. Guo, A. Ichimura, H. Tsuji, E. Nakamura	4. 巻 138
2. 論文標題 Three-Dimensionally Homoconjugated Carbon-Bridged Oligophenylenevinylene for Perovskite Solar Cells	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 J. Am. Chem. Soc.	6. 最初と最後の頁 10897-10904
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.6b04002	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 Y. Guo, W. Sato, K. Inoue, W. Zhang, G. Yu, E. Nakamura	4. 巻 4
2. 論文標題 N-Type Doping for Efficient Polymer Electron-Transporting Layers in Perovskite Solar Cells	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 J. Mater. Chem. A	6. 最初と最後の頁 18852-18856
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C6TA08526A	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 L. Ilies, Y. Itabashi, R. Shang, E. Nakamura	4. 巻 7
2. 論文標題 Iron/Zinc-Cocatalyzed Directed Arylation and Alkenylation of C(sp ³)-H Bonds with Organoborates	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 ACS Catal.	6. 最初と最後の頁 89-92
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acscatal.6b02927	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. Nitta, K. Harano, M. Isomura, E. H. G. Backus, M. Bonn, E. Nakamura	4. 巻 139
2. 論文標題 Conical Ionic Amphiphiles Endowed with Micellization Ability but Lacking Air- and Oil-Water Interfacial Activit	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 J. Am. Chem. Soc.	6. 最初と最後の頁 7677-7680
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.7b01596	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 T. Tsubota, K. Harano, E. Nakamura	4. 巻 137
2. 論文標題 Cooperative Self-Assembly of Gold Nanoparticles on the Hydrophobic Surface of Vesicles in Water, R. M. Gorgoll	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 J. Am. Chem. Soc.	6. 最初と最後の頁 7568-7571
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.5b03632	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 R. Shang, L. Ilies, E. Nakamura	4. 巻 137
2. 論文標題 Iron-Catalyzed Directed C(sp ²)-H and C(sp ³)-H Functionalization with Trimethylaluminum	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 J. Am. Chem. Soc.	6. 最初と最後の頁 7660-7663
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.5b04818	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 M. Morales-Vidal, P. G. Boj, J. M. Villalvilla, J. A. Quintana, Q. Yan, N.-T. Lin, X. Zhu, N. Ruangsupapichat, J. Casado, H. Tsuji, E. Nakamura, M. A. Diaz-Garcia	4. 巻 6
2. 論文標題 Carbon-bridged oligo(p-phenylenevinylene)s for photostable and broadly tunable, solution-processable thin film organic lasers	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 Nat. Commun.	6. 最初と最後の頁 8458
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/ncomms9458	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 Y. Guo, K. Shoyama, W. Sato, Y. Matsuo, K. Inoue, K. Harano, C. Liu, H. Tanaka, E. Nakamura	4. 巻 137
2. 論文標題 Chemical Pathways Connecting Lead(II) Iodide and Perovskite via Polymeric Plumbate(II) Fiber,	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 J. Am. Chem. Soc.	6. 最初と最後の頁 15907-15914
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.5b10599	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 T. Matsubara, L. Ilies, E. Nakamura	4. 巻 11
2. 論文標題 Oxidative C-H Activation Approach to Pyridone and Isoquinolone via Iron-Catalyzed Coupling of Amide with Alkyne	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Chem.Asian.J.	6. 最初と最後の頁 380-384
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/asia.201501095	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 T. Nakamura, S. Furukawa, E. Nakamura	4. 巻 11
2. 論文標題 Benzodipyrrrole-Based Donor-Acceptor-Type Boron Complexes as Tunable Near-Infrared-Absorbing Materials	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Chem.Asian.J.	6. 最初と最後の頁 2016-2020
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/asia.201600925	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 V. W. Bergmann, Y. Guo, H. Tanaka, I. M. Hermes, D. Li, A. Klasen, S. A. Bretschneider, E. Nakamura, R. Berger, S. A. L. Weber,	4. 巻 8(30)
2. 論文標題 Local Time-Dependent Charging in a Perovskite Solar Cell	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 ACS Appl. Mater. Interfaces	6. 最初と最後の頁 19402-19409
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsami.6b04104	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 R. M. Gorgoll, K. Harano, E. Nakamura	4. 巻 138(30)
2. 論文標題 Nanoscale Control of Polymer Assembly on a Synthetic Catalyst-Bilayer System	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 J. Am. Chem. Soc.	6. 最初と最後の頁 9675-9681
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.6b05414	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 R. Shang, L. Ilies, E. Nakamura	4. 巻 138
2. 論文標題 Iron-catalyzed ortho C-H Methylation of Aromatics Bearing a Simple Carbonyl Group with Methylaluminum and Tridentate Phosphine Ligand	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 J. Am. Chem. Soc.	6. 最初と最後の頁 10132-10135
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.6b06908	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 P. Bairei, K. Minami, J. P. Hill, W. Nakanishi, L. K. Shrestha, C. Liu, K. Harano, E. Nakamura, K. Ariga	4. 巻 10
2. 論文標題 Supramolecular Differentiation for Constructing Anisotropic Fullerene Nanostructures by Time-Programmed Control of Interfacial Growth	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 ACS Nano	6. 最初と最後の頁 8796-8802
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnano.6b04535	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45件（うち招待講演 45件 / うち国際学会 32件）

1. 発表者名 Eiichi Nakamura
2. 発表標題 Nano science explored with porphyrins
3. 学会等名 International Conference on Porphyrins and Phthalocyanines 2018, Munich (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Eiichi Nakamura
2. 発表標題 A Journey from Organic Synthesis to Electron Microscopy
3. 学会等名 Symposium in Memory of Professor Gilbert Stork, Columbia University (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Eiichi Nakamura
2. 発表標題 The 4th STEPS Symposium on Photon Science
3. 学会等名 Probing the mechanism of chemical reactions with electron microscopy, University of Tokyo (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Eiichi Nakamura
2. 発表標題 Iron Catalysis for Organic Synthesis
3. 学会等名 Nankai Univeristy Lecture, China (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Eiichi Nakamura
2. 発表標題 Iron-catalyzed C-H activation
3. 学会等名 18th Asian Chemical Congress, Taipei (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Eiichi Nakamura
2. 発表標題 Element strategy initiative - Iron catalysis for organic synthesis -
3. 学会等名 MIT Buchi lecture #2, USA (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Eiichi Nakamura
2. 発表標題 Iron catalysis for organic synthesis
3. 学会等名 Merck, USA (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Eiichi Nakamura
2. 発表標題 Solid State Chemistry in Perovskite Solar Cells
3. 学会等名 The 15th International Conference on Advanced Materials, Kyoto (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Eiichi Nakamura
2. 発表標題 The Chemistry of Lead Perovskite Solar Cells
3. 学会等名 College of Chemistry and Molecular Science, Wuhan University (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Eiichi Nakamura
2. 発表標題 Chemistry of Lead Perovskite Solar Cell Devices
3. 学会等名 International Symposium on Energy Science and Technology 2018 (ISEST 2018), OIST, Okinawa (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Eiichi Nakamura
2. 発表標題 Solid State Chemistry in Organic and Inorganic Solar Cells
3. 学会等名 Symposium on Frontiers of Molecular Science and Technology, Koshiba Hall, The University of Tokyo (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Eiichi Nakamura
2. 発表標題 Chemistry - A Bridge between Molecular and Real Worlds
3. 学会等名 The 20th ISIR International Symposium "Molecular Technology Frontiers toward I o T World", Osaka (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Eiichi Nakamura
2. 発表標題 Iron catalysis for organic synthesis
3. 学会等名 ACS Publications Symposium, Innovation in Molecular Science, Beijing (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 中村栄一
2. 発表標題 化学 - 分子世界と実世界の架け橋
3. 学会等名 有機合成化学協会, 有機金属部会第1回例会, 大阪科学技術センター (招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 中村栄一
2. 発表標題 分子と実社会を結ぶ分子技術
3. 学会等名 サイエンステクノフロンティアフォーラム・駒場 (招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 中村栄一
2. 発表標題 化学 - 分子と社会を結ぶ架け橋
3. 学会等名 有機合成協会近畿支部講演会, 三重大学 (招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 中村栄一
2. 発表標題 化学 - 分子と社会を結ぶ架け橋
3. 学会等名 名古屋大学工学部講演会 (招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 中村栄一
2. 発表標題 分子世界と実世界を結ぶ化学
3. 学会等名 有機合成化学協会, 有機合成講習会, 日本薬学会長井記念ホール (招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 原野幸治
2. 発表標題 高分解能電子顕微鏡で切り開くナノ・メゾ分子集合体科学
3. 学会等名 立教大学特別講義 (招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Eiichi Nakamura
2. 発表標題 Atomic Resolution Electron Microscopy for Organic Chemistry
3. 学会等名 2nd International Symposium on NanoCarbons", HUST, Wuhan, China (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Eiichi Nakamura
2. 発表標題 Atomic Resolution Electron Microscopy for Organic Chemistry
3. 学会等名 Department Seminar, East China University of Science and Technology, Shanghai, China (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Eiichi Nakamura
2. 発表標題 Iron catalysis for organic synthesis
3. 学会等名 Merck Seminar, New York, USA (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Eiichi Nakamura
2. 発表標題 Chemistry: A bridge between molecular and real worlds - Atomic resolution electron microscopy for organic chemistry -
3. 学会等名 Columbia University Seminar, New York, USA (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Eiichi Nakamura
2. 発表標題 A bridge between molecular and real worlds - Atomic Resolution Electron Microscopy for Organic Chemistry -
3. 学会等名 Zhejiang University Global Lecture Series, Hangzho, China, (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Eiichi Nakamura
2. 発表標題 Atomic Resolution Electron Microscopy for Organic Chemistry
3. 学会等名 Wurtzburg Siegfried Huenig Lecture,, Germany (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Eiichi Nakamura
2. 発表標題 Element strategy initiative - Iron catalysis for organic synthesis -
3. 学会等名 MIT Buchi lecture #2, Boston, USA (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Eiichi Nakamura
2. 発表標題 Chemistry: A bridge between molecular and real worlds - Atomic resolution electron microscopy for organic chemistry -
3. 学会等名 MIT Buchi lecture #1, Boston, USA (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Koji Harano
2. 発表標題 The New Frontiers of Organic and Supramolecular Chemistry Explored by High-resolution Electron Microscopy
3. 学会等名 Department Lecture, University of Zurich, Switzerland, 2017/5/18 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Eiichi Nakamura
2. 発表標題 Atomic Resolution Electron Microscopic Imaging of Single Organic Molecules in Action. From Fundamental Science to Pharmaceutical Production
3. 学会等名 第4回Tishiler-Omura講演会(招待講演)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 Eiichi Nakamura
2. 発表標題 Chemistry at Mesoscopic Regime Connecting the Molecular World and the Real World
3. 学会等名 IUPAC World Chemistry Congress(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 Eiichi Nakamura
2. 発表標題 Atomic-resolution Electron Microscopy for Chemistry: From Brain and Fancy to plainness of Observations
3. 学会等名 Micrographia 350: new ages of microscopy 1665 to 2015(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 Eiichi Nakamura
2. 発表標題 Chemistry at Mesoscopic Regime Connecting the Molecular and the Real World
3. 学会等名 SIOC Wang Yu Lectureship, Shanghai Institute of Organic Chemistry(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 Eiichi Nakamura
2. 発表標題 Atomic-resolution Electron Microscopy for Chemistry - From Brain and Fancy to Plainness of Observations -
3. 学会等名 CEMSupra2016 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 中村栄一
2. 発表標題 新しい電子顕微鏡科学を基軸としたゆらぎ分子システムの分子技術
3. 学会等名 日本化学会第96春季年会 (招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 中村栄一
2. 発表標題 鉛ペロブスカイト結晶成長と光電変換 ATP招待講演
3. 学会等名 日本化学会第96春季年会 (招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Eiichi Nakamura
2. 発表標題 Chemistry at Nano and Mesoscopic Interfaces
3. 学会等名 Japan-US joint symposium Nanocarbon Minisymposium in Honor of ACS President Donna Nelson (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Eiichi Nakamura
2. 発表標題 Atomic Resolution Electron Microscopy: A New Tool for Organic Chemists
3. 学会等名 Organic Chemistry Seminar at UCLA (招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Eiichi Nakamura
2. 発表標題 Atomic Resolution Electron Microscopy: A New Tool for Organic Chemists
3. 学会等名 Organic Chemistry Seminar at CALTECH (招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Eiichi Nakamura
2. 発表標題 Atomic Resolution Electron Microscopy: A New Tool for Organic Chemists
3. 学会等名 Boehringer Ingelheim Lecture, The Scripps Research Institute (招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Eiichi Nakamura
2. 発表標題 Atomic Resolution Electron Microscopy: A New Tool for Organic Chemists
3. 学会等名 Organic Chemistry Seminar at USSD (招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Eiichi Nakamura
2. 発表標題 Chemistry at Nano-Mesoscopic Interface
3. 学会等名 International Symposium On Functional Molecules And Materials : From Small to Big (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Eiichi Nakamura
2. 発表標題 Interface between molecular and real world
3. 学会等名 BOSS XV Antwerp (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Eiichi Nakamura
2. 発表標題 Studying Iron Catalysis for Organic Synthesis
3. 学会等名 CREST-JST and Princeton University Chemistry Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Eiichi Nakamura
2. 発表標題 Atomic Resolution Electron Microscopy: A New Tool for Organic Chemists
3. 学会等名 2nd Curo-Pi Symposium in Eugene, Oregon (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Eiichi Nakamura
2. 発表標題 Atomic Resolution Electron Microscopy for Organic Chemists
3. 学会等名 Ischia Advanced School of Organic Chemistry 2016 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計3件

産業財産権の名称 架橋フェニレンピニレン化合物色素を用いたレーザー素子	発明者 中村栄一, 辻勇人, Maria Garcia他	権利者 東京大学・アリ カンテ大学(ス 페인)
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/ES2016/070493	出願年 2016年	国内・外国の別 外国

産業財産権の名称 医薬活性を有する有機化合物の球形の結晶粒子	発明者 中村栄一, 原野幸 治, 劉超, 鈴木俊 平, 助川潤平, 西口	権利者 東京大学、東和 薬品
産業財産権の種類、番号 特許、特願2016-233395	出願年 2016年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 光電変換素子及び太陽電池モジュール	発明者 中村栄一, Rui Shang, 武井出, 他	権利者 東京大学、三菱 ケミカル
産業財産権の種類、番号 特許、特願2017-167613	出願年 2017年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

<p>東京大学「革新分子技術」総括寄付講座 http://www.chem.s.u-tokyo.ac.jp/users/common/NakamuraLab.html 研究概要 「活性炭素クラスター」の合成・機能 http://www.chem.s.u-tokyo.ac.jp/~common/NakamuraLab.html 東京大学中村研究室研究概要 http://www.chem.s.u-tokyo.ac.jp/~common/NakamuraLab.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
研究分担者	原野 幸治 (Harano Koji) (70451515)	東京大学・総括プロジェクト機構・特任准教授 (12601)	
研究分担者	野入 英世 (Noiri Eisei) (00301820)	東京大学・医学部附属病院・特任研究員 (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