

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：12604

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2020

課題番号：17H02735

研究課題名（和文）カーボンナノチューブの近赤外発光を制御する方法の構築

研究課題名（英文）Construction of methods for controlling near-infrared photoluminescence properties of carbon nanotubes

研究代表者

前田 優（MAEDA, Yutaka）

東京学芸大学・教育学部・教授

研究者番号：10345324

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、単層カーボンナノチューブ（SWNTs）の化学修飾によって、その近赤外発光波長の制御する方法の構築を行い、970 nmに発光を有する(6,5) SWNTsについて1100 nmから1268 nmの範囲で選択的に発光を発現させる分子変換法の構築を達成した。ここでは、化学修飾に用いる反応基質の立体効果や付加様式を速度論的、あるいは熱力学的に制御する方法を開発するとともに、その仕組みについて理論計算と実験結果の比較から明らかにした。さらに、SWNTs付加体の精密分離と光学分割を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近赤外発光は、リアルタイムで深度の深いバイオイメージングや光通信技術への応用が期待されている。これまでにSWNTsを近赤外発光材料として用いた研究が進められてきたが、量子収率が低く、波長選択性に制限があった。本研究により、発光波長の選択性が広がり、また、量子収率が向上したことから、実用化研究においても有意な材料としての付加価値が高まった。さらに、SWNTsの付加様式を検証する方法として発光分析が有効であることを実証し、SWNTs付加体の高純度化を達成したことから、広く基礎研究や応用研究に貢献する成果である。

研究成果の概要（英文）：In this project, we constructed methods to control the near-infrared photoluminescence properties of single-walled carbon nanotubes (SWNTs) by chemical functionalization. We have achieved the emergence of new PL peaks of (6,5) SWNTs adducts from 1100 nm to 1268 nm depending on the functionalization methods and the reagents used. By designing the reagents, the addition patterns of SWNTs can be controlled kinetically or thermodynamically, which is supported by the results of theoretical calculations. In addition, we achieved chiral separation and optical resolution of the SWNTs adducts.

研究分野：有機化学

キーワード：単層カーボンナノチューブ 化学修飾 近赤外発光

1. 研究開始当初の背景

半導体型の単層カーボンナノチューブは、構造（直径と基本構造となる六員環の配列）によって、近赤外領域に渡り鋭い特性吸収を持ち、近赤外発光を生じる。近赤外光は生体透過性に優れることや光損失の小さい領域であることから、近赤外発光はバイオイメージングや光通信への活用が進められており、これらの応用研究において、SWNTsの近赤外発光の有効性が実証されている。ここでは、発光の量子収率が低い点や剛直な構造に起因してストークスが小さいことが課題の一つであったが、近年、SWNTsにアリアル化や酸化を行うと、適切な化学修飾率において発光効率の高い新しい発光が生じることが見出された。これらの背景のもと、我々はSWNTsのアルキル化反応によって、波長の異なる化学修飾に由来する発光を発現できることや、発光波長によって量子収率が異なることなどを見出すことに成功してきた。これらの研究の結果、発光波長や発光効率の制御において、化学修飾に用いる反応基質の設計とSWNTsの化学修飾率が重要であると考えるに至った。

2. 研究の目的

本研究では、化学修飾により導入する付加基の構造に基づいて、SWNTsの近赤外発光を制御する方法を構築し、SWNTsの発光材料としての特性を大きく向上させることを目的とした。具体的には、反応活性点を1つあるいは2つ有する反応基質を設計して、SWNTs付加体を合成すること。そして、得られたSWNTs付加体の光学的性質の評価を行い、SWNTsの発光特性を制御する方法を構築することについて検討した。

3. 研究の方法

付加基の構造に基づいてSWNTsの近赤外発光特性を制御する方法を開発するために、1) 高さを段階的に変えた反応基質の合成と、2) 分子内に反応点を2つ有する反応基質の合成を行い、これらを用いてSWNTs付加体を合成した。合成したSWNTs付加体について、可視-近赤外吸収スペクトル、ラマン分光、発光スペクトルなどの分光学的評価を行った。これらの反応基質の分子構造と分光学的評価を総合的に比較・考察していくことで、付加基の分子構造とSWNTsの発光特性の関係性について明らかにした。

4. 研究成果

(1) SWNTs付加体の発光波長を制御する因子の解明：付加基の高さが及ぼす化学修飾率と発光波長への効果

SWNTsと同様に歪んだ π 電子系を有するフラーレンにおいて、種々の付加反応が開発されている。二重結合への付加反応が進行すると 60π 電子系が 58π 電子系となり、付加基の位置関係によって分子軌道が大きく変化することが明らかにされている。フラーレンの付加位置の選択性は、用いる反応基質の化学反応性や立体構造によって支配され、1,2-付加体や1,4-付加体、1,6-付加体の合成が達成されている。SWNTsの付加反応においても、反応基質の立体障害の程度と化学修飾量や付加様式に相関関係を見出すことができれば、化学修飾により発現する近赤外発光の強度や発光波長について制御する方法論として活用し得ると期待した。付加基近傍での構造の違いは、化学反応性や付加様式などを変える因子となり得ることから、臭化ベンジルを基本的な骨格として選択し、反応活性点から離れた位置のフェニル基の3,5位に置換基を配置したデンドロンをSWNTsの付加反応に用いる反応基質として設計し、1~3段階の繰り返し単位を持つ3つのデンドロン(G1Br~G3Br)を合成した(図1)。これらのデンドロンを用いて、SWNTs付加体(SWNTs-G1~SWNTs-G3)を合成し、Raman分光のDバンドとGバンドの比率(D/G)から化学修飾率の違いについて比較した。デンドロンの世代が大きくなるにつれてD/Gが大きくなることから、反応基質の立体障害が大きくなると化学修飾率が低下することが示唆される。吸収スペクトルの特性吸収強度の変化からも、反応基質の構造と化学修飾率の関係性を支持する結果が得られた。SWNTs-G1~SWNTs-G3の発光スペクトルを測定したところ、吸収スペクトルおよびラマンスペクトルで見積もった化学修飾率に相関を持って(6,5)SWNTsに帰属される E_{11} 発光の強度が減少し、新たに1100 nm (E_{11}^*) および1230 nm (E_{11}^{**}) に発光が発現した。これらの発光の強度比(E_{11}^*/E_{11}^{**})は、化学修飾率が高くなるにつれて減少した。

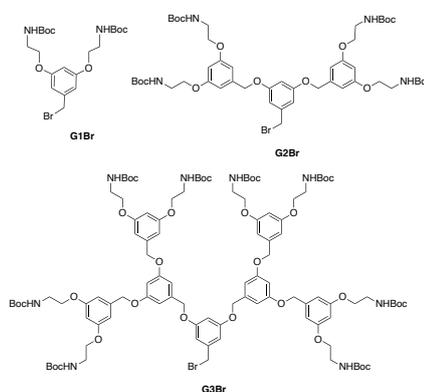


図1. G1Br, G2Br, G3Brの分子構造

Htoonらは、密度汎関数理論を用いた1,2-付加、1,4-付加した際のモデル分子の電子状態計算を行い、アリアル化した(6,5)SWNTsから生じる近赤外発光の帰属を検討している。実験ではア

リアル化することで(6,5) SWNTs から 1120 nm 付近に新たな発光が生じる。Ph 基が 2 つ、あるいは Ph 基と水素原子が付加した場合のモデル分子の発光エネルギー(計算値)との比較から、アリール基と水素原子が 1,2-付加(L₃₃)することでバンドギャップが局所的に減少した'量子欠陥'が生じ、この準位に捕捉された励起子からの発光が検出されていたと推定している¹。そこで、デンドロンが 2 つ付加したモデル分子とデンドロンと水素原子が 1 つずつ付加したモデル分子についての理論計算を行い、以下の知見を得た。デンドロンが 2 つ付加した場合、デンドロンの世代が増えると、1,2-付加体の相対的な熱力学的安定性が低下していき、1,4-付加体の安定性が增大すること。デンドロンと水素原子が付加した場合、1,4-付加体に対する 1,2-付加体の相対安定性は高く、世代が増大してもその傾向は変わらないこと。1,2-付加体や 1,4 付加体には、SWNTs の軸方向に対して角度の異なる 3 つの位置異性体が存在し、これらの異性体間で HOMO-LUMO ギャップは異なること。1,2-付加体、1,4-付加体、1,6-付加体を比較すると、付加位置が遠くなるにつれて、モデル分子の HOMO-LUMO ギャップは小さくなる傾向があること。

Htoon らの帰属を参考にして、SWNTs 付加体からの発光波長(実験結果)とモデル分子の HOMO-LUMO ギャップの比較から考察すると、以下のことが推察される。デンドロンの世代が小さく立体障害が小さい場合には、デンドロンと水素原子の付加反応と、デンドロン 2 つの付加反応が進行し、E₁₁*と E₁₁**発光が発現すること。デンドロンの世代が大きくなり、デンドロン同士やデンドロンと SWNTs 間の立体反発の影響が大きくなると、SWNTs の化学修飾率が低下すること、デンドロンと水素原子の付加の選択性が増大し、E₁₁*発光の選択性が増大すること。

SWNTs-G1 について熱処理を行い、付加基の部分脱離をしたところ、E₁₁**発光強度の減少を伴って E₁₁*の強度が増大した。このことは、デンドロンと水素原子が付加した付加体よりも、デンドロンが 2 つ付加した付加体の方がデンドロン間の立体反発によって、熱力学的に不安定であることを示唆している。

(2) SWNTs 付加体の発光波長を制御する因子の解明：環化付加反応により環歪みの及ぼす効果

理論計算によると、SWNTs の骨格を歪ませると、SWNTs のカイラリティによってバンドギャップが大きくなったり小さくなったりする²。この性質を利用して、SWNTs のバンドギャップの変化から歪みの程度を評価する、歪みセンサーの開発も検討がなされている。SWNTs と同様に歪んだ π 電子系を有するフラーレンにおいて、化学修飾と骨格の歪みの関係性について検討がなされており、歪みの高い箇所は化学反応性が高く、また化学修飾により sp³ 炭素に変換された炭素付近の π orbital axis vector (POAV) 値が大きく変化することが示されている。すなわち、SWNTs の付加反応においても、付加位置近傍の骨格は付加反応によって歪みの程度が大きく変化することが推定される。反応点を 2 つ有する反応基質のスペーサーの長さを変えることで環化付加した際の環歪みの程度が変わり、これに対応して局所構造のバンドギャップも変化すると考えた。電子的効果の影響を最小にするために、スペーサーは単純なアルキル基として、炭素鎖を 3~5 の範囲とした。これにより、立体電子的に環化反応の選択性が向上することを期待した。ジブromoアルカンを用いて SWNTs 付加体 (SWNTs-(CH₂)_n) を合成したところ、吸収スペクトルおよび Raman スペクトル分析によって、対応するブromoアルカンよりも化学修飾率が高いことが明らかとなった。これは立体電子的に感化反応が有利に進行することに起因すると考えられる。発光スペクトル測定を行ったところ、対応するブromoアルカンでは 1100 nm 付近 (E₁₁*発光) と 1230 nm 付近 (E₁₁**発光) に化学修飾由来の発光が 2 つ発現するのに対して、ジブromoアルカンでは波長選択的に E₁₁**発光が発現し、その発光波長はスペーサーの炭化水素鎖長の違いによって異なり 1215~1242 nm の範囲となることが明らかとなった。特に炭化水素鎖長が 3 の場合に、1215 nm と他のジブromoアルカンに比べて著しく短波長側に発光が発現した。

環化付加体として期待される 3 つの 1,2-付加体の位置異性体 (L₃₃, L₈₇, L₂₇) について、炭素鎖長 n = 3~5 のモデル分子を用いた理論計算を行ったところ、炭素鎖長の違いよりも付加位置の違いの方が、HOMO-LUMO ギャップに対する影響が大きいことが明らかとなった。HOMO-LUMO ギャップへの影響が大きいことから、付加位置の違いは E₁₁*、や E₁₁**発光の選択性を支配する因子であり、炭素鎖長の違いは E₁₁**発光の波長が 1215 nm ~ 1242 nm の間の選択性を支配する因子となると考えられる。付加反応によって形成される小員環の環歪みの程度を、付加位置炭素周りの結合角の和を指標として考察すると、理論計算から求めた環歪みと HOMO-LUMO ギャップ、実験で観測された発光波長の間の良い相関関係があることが明らかとなり、SWNTs 付加体の付加位置炭素周りの歪みが、量子欠陥のバンドギャップエネルギーを支配する因子となり得ることが支持される結果が得られた。

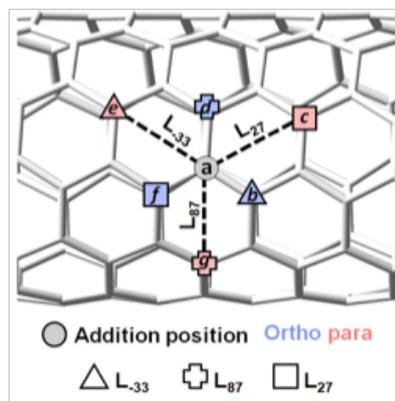


図. 1,2-付加体と 1,4-付加体の付加位置を表すモデル。a-b (1,2-付加体 L₃₃) a-c (1,4-付加体 L₂₇) a-d (1,2-付加体 L₈₇) a-e (1,4-付加体 L₃₃) a-f (1,2-付加体 L₂₇) a-g (1,4-付加体 L₈₇)

(3) SWNTs 付加体の発光波長を制御する因子の解明：環化付加体の熱力学的支配による異性化反応

SWNTs の環化付加反応では、 E_{11}^{**} 発光が選択的に発現した。Htoon らのアリール化 SWNTs の位置異性体の帰属を参考に、理論計算により算出したモデル分子の HOMO-LUMO ギャップから、ジプロモアルカンとの反応では 1,2-付加体 (L_{87}) が得られたと推定される。1,2-付加体 (L_{87}) は、1,2-付加体の異性体の中では熱力学的に不安定な異性体であることから、速度論生成物と考えられる。中間体のスピン密度からも、測定論生成物として妥当な付加位置であることが支持される。そこで嫌気下における熱反応を行ったところ、特定の環化付加体において、1215 nm ~ 1224 nm の発光が 1249 ~ 1268 nm にシフトすることが明らかとなった。条件制御に成功した付加体では、選択的に新しい発光へとすることができ、50 nm を超える範囲での発光波長制御ができることがわかった。SWNTs 付加体を熱反応により発光波長を制御した例として世界に先駆けた研究成果である。発光波長の変化は SWNTs 付加体の異性化反応を支持するものである。

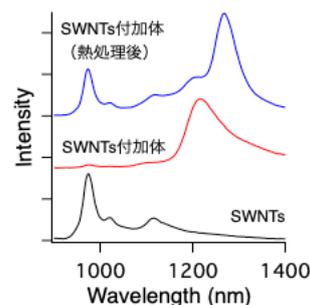


図. SWNTs, SWNTs 付加体, 熱処理した SWNTs 付加体の発光スペクトル

(4) SWNTs の超音波を用いた発光制御方法の開発

SWNTs の発光分析は、半導体 SWNTs のカイラリティを帰属する上で、最も優れた方法の一つである。2002 年の Weisman らの報告³より、SWNTs の合成や反応、分離実験における選択性の評価など、半導体型 SWNTs の評価において欠かせない分析方法として広く活用されている。発光分析においては、金属型 SWNTs やよりバンドギャップの小さい半導体型 SWNTs に寄って消光されることから、界面活性剤存在下、重水中で超音波分散させてから測定する方法が一般的である。一方、環境保全の観点から界面活性剤を超音波照射して分解させる研究がなされており、水を超音波照射することでヒドロキシラジカルや過酸化水素が発生し、これらが界面活性剤をラジカル反応によって分解していくことが報告されている⁴。SWNTs はラジカル反応性が高いことから、SWNTs を界面活性剤存在下、水あるいは重水中で超音波照射することで、化学反応が進行する可能性があり、これまでも超音波照射をすることで、SWNTs の光学特性が消失していくことや短尺化することに関する報告例がある。SWNTs の界面活性剤を用いた高分散化は、SWNTs およびその付加体の光学特性の評価において、大変重要な基本的な技術であることから、SWNTs の濃度、超音波照射の時間、雰囲気、ラジカル補足剤の有無などの条件制御を行い、SWNTs への超音波照射の及ぼす効果について調査した。結果として、SWNTs を低濃度で分散処理をかけることで、超音波照射の影響が顕在化すること、超音波照射によって酸化反応が進行すること、不活性ガス雰囲気下では界面活性剤由来のラジカル種の付加反応が進行すること、ラジカル補足剤の添加により酸化反応が促進かつ選択的に進行することが明らかになった。酸化反応と有機ラジカルの付加反応の切り替えによって、前者では 1120 nm の発光を、後者ではこれに加えて 1230 nm 付近の発光を発現できる。本研究成果によって、SWNTs の分散液を調製する際の基本的な留意事項と、量子ドットを簡便に導入する方法論を明らかにすることができた。

(5) SWNTs 付加体の光学分割

SWNTs を選択的に合成する方法の開発は、SWNTs の優れた性質を引き出し、実用化するために欠かせない技術である。現在の SWNTs の大量合成方法では、限られた構造の SWNTs の割合を一定程度高めることができるので、これを分離精製することで単一構造の SWNTs を得る努力がなされている。その中でもアガロースゲルを用いたゲルクロマトグラフィー法では、単一構造の SWNTs を分離し、かつ、光学分割も達成されている⁵。一方、SWNTs 付加体の分離精製についてはほとんど報告例がないのが実情である。SWNTs 付加体を分離精製することができれば、SWNTs 付加体の評価・分析の精度が向上し、材料としての価値も飛躍的に向上する。これらのことから本研究では、発光特性を制御した SWNTs 付加体についての分離精製を検討し、光学異性体である (6,5)SWNTs 付加体と (11,5)SWNTs 付加体の光学分割を達成した。得られた付加体の濃度消光効果を明らかにすることにも成功した。SWNTs 付加体の光学分割の例として世界に先駆けた研究成果である。

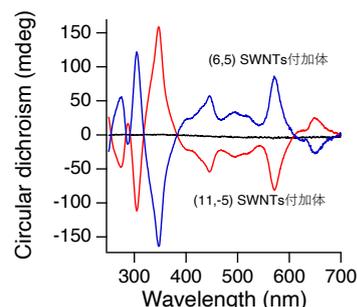


図. SWNTs 付加体 (ラセミ体) およびその光学分割後の CD スペクトル。

<参考文献>

1. He, X. et al., *ACS Nano*, **2017**, *11*, 10785.
2. Yang, L. et al. *Condens. Matter. Phys.* **2000**, *60*, 13874.
3. Bachilo, S. M. et al, *Science* **2002**, *298*, 2361.
4. Ashokkumar, M. et al. *Aust. J. Chem.* **2003**, *56*, 1045.
5. Wei, X. et al., *J. Am. Chem. Soc.* **2017**, *139*, 16068.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Maeda, Y.; Konno, Y.; Yamada, M.	4. 巻 124
2. 論文標題 Helicity Sorting and Optical Resolution of Functionalized Single-Walled Carbon Nanotubes and Their Optical Properties	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J. Phys. Chem. C	6. 最初と最後の頁 21886-21894
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.0c07963	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 Maeda, Y.; Konno, Y.; Nishino, A.; Yamada, M.; Okudaira, S.; Miyauchi, Y.; Matsuda, K.; Matsui, J.; Mitsuishi, M.; Suzuki, M.	4. 巻 12
2. 論文標題 Sonochemical Reaction to Control the Near Infrared Photoluminescence Properties of Single-Walled Carbon Nanotubes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nanoscale	6. 最初と最後の頁 6263-6270
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D0NR00271B	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 Maeda, Y.; Murakoshi, H.; Tambo, H.; Zhao, P.; Kuroda, K.; Yamada, M.; Zhao, X.; Nagase, S.; Ehara, M.	4. 巻 55
2. 論文標題 Thermodynamic control of quantum defects on single-walled carbon nanotubes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Chem. Commun.	6. 最初と最後の頁 13757-13760
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C9CC05623H	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 Maeda, Y.; Kuroda, K.; Tambo, H.; Murakoshi, H.; Konno, Y.; Yamada, M.; Zhao, P.; Zhao, X.; Nagase, S.; Ehara, M.	4. 巻 9
2. 論文標題 Influence of local strain caused by cycloaddition on the band gap control of functionalized single-walled carbon nanotubes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 RSC Adv.	6. 最初と最後の頁 13998-14003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C9RA02183C	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 Zhao, P.; Maeda, Y.; Ehara, M	4. 巻 123
2. 論文標題 Theoretical Insight into Configurational Selectivity of Functionalized Single-Walled Carbon Nanotubes Based on Clar Sextet Theory	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J. Phys. Chem. C.	6. 最初と最後の頁 18629-18537
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.9b03655	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 Maeda, Y.; Konno, Y.; Yamada, M.; Zhao, P.; Zhao, X.; Ehara, M.; Nagase, S	4. 巻 18
2. 論文標題 Control of near infrared photoluminescence properties of single-walled carbon nanotubes by functionalization with dendrons	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nanoscale	6. 最初と最後の頁 23012-23017
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C8NR07983H	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

[学会発表] 計32件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Yui Konno, Michio Yamada, Yutaka Maeda
2. 発表標題 Chirality and helicity sorting of functionalized single-walled carbon nanotube
3. 学会等名 The 60th Fullerenes-Nanotubes-Graphene General symposium
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 紺野 優以, 西野 朱音, 山田 道夫, 前田 優, 奥平 早紀, 宮内 雄平, 松田 一成, 松井 淳, 三ツ石 方也, 鈴木 光明
2. 発表標題 超音波照射による簡便で効果的な単層カーボンナノチューブの発光特性制御
3. 学会等名 The 58th Fullerenes-Nanotubes-Graphene General symposium
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yutaka Maeda, Yuya Takehana, Shun Minami, Akane Nishino, Yui Konno, Michio Yamada, Jing S. Dang, Wai W. Wang, Shigeru Nagase, Yuhei Miyauchi, Kazunari Matsuda, Yoko Iizumi, Toshiya Okazaki
2. 発表標題 Effect of functionalization and subsequent thermal treatment on photoluminescence properties of single-walled carbon nanotubes
3. 学会等名 7th workshop on nanotube potics and nanospectroscopy (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yui Konno, Michio Yamada, Yutaka Maeda, Pei Zhao, Xiang Zhao, Masahiro Ehara, Shigeru Nagase
2. 発表標題 Control of functionalization degree and infrared photoluminescence properties of single-walled carbon nanotube by reductive alkylation
3. 学会等名 The 55th Fullerenes-Nanotubes-Graphene General symposium
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yutaka Maeda
2. 発表標題 Functionalization of single-walled carbon nanotubes Control of their photoluminescence properties
3. 学会等名 2nd International Symposium on NanoCarbons - Fullerenes, Endofullerenes, Carbon Nanotubes, Graphenes and Carbon Nanostructures (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 前田 優, 武埜 祐哉, Dang Jing-Shuang, 鈴木 光明, 山田 道夫, 永瀬 茂
2. 発表標題 アルキル化単層カーボンナノチューブの熱安定性と発光特性に及ぼす化学修飾率の影響
3. 学会等名 The 53th Fullerenes-Nanotubes-Graphene General symposium
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 前田 優、西野朱音、曾根絵理香、天谷優里、山田道夫、Wang Wei-Wei、永瀬茂
2. 発表標題 ジスルフィドによって光参加した単層カーボンナノチューブの発光特性と熱処理
3. 学会等名 第44回有機典型元素化学討論会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 前田優、山田道夫、紺野優以、鈴木光明（分担執筆）	4. 発行年 2019年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 456
3. 書名 カーボンナノチューブの表面処理・分散技術と適合化事例	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>自然科学系 教員紹介 http://univinfo.u-gakugei.ac.jp/u-gakugei/hp/ymaeda1.html 研究室ホームページ http://www.u-gakugei.ac.jp/~ymaeda/orgchem/index.html 前田優、山田道夫、実践報告 スモールスケール実験：フラーレンC60の分離と化学反応、2019, 67, 426-429. 前田優、紺野優以、カーボンナノチューブの化学修飾による発光制御、応用物理学会, 2019, 3, 180-184. 前田優、カーボンナノチューブのバンド構造と化学反応、ケミカルエンジニアリング、2019, 64, 310-318. 前田優、光るナノカーボン：化学修飾によるカーボンナノチューブの近赤外発光特性の制御、The Chemical Times, 2018, 247, 21-27.</p>

6. 研究組織						
<table border="1"> <thead> <tr> <th>氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)</th> <th>所属研究機関・部局・職 (機関番号)</th> <th>備考</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> </tbody> </table>	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			
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
---------	---------

中華人民共和國	西安交通大學			
---------	--------	--	--	--