

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 9 月 9 日現在

機関番号：12604  
研究種目：基盤研究(B) (一般)  
研究期間：2021～2023  
課題番号：21H01759  
研究課題名(和文) 化学修飾による近赤外発光性カーボンナノチューブライブラリーの構築と高純度化

研究課題名(英文) Construction of near-infrared emitting carbon nanotube library by chemical functionalization and purification

研究代表者  
前田 優 (Maeda, Yutaka)  
東京学芸大学・連合学校教育学研究科・教授

研究者番号：10345324  
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、カーボンナノチューブの側面化学修飾を行い、局所的に電子共役系を変調することで局所的にバンド構造を制御し、バイオイメージングや光通信に利用可能な、広範囲に渡る近赤外波長域に、発光を選択的に発現させる方法を開発した。また、カイラル指数に基づいて、カーボンナノチューブ付加体を分離精製することを実現し、構造の異なるカーボンナノチューブに及ぼす化学修飾の影響を評価するとともに、励起波長と発光波長を大きく拡張することに成功した。これにより、本研究目的である近赤外発光性カーボンナノチューブライブラリーの構築と高純度化を達成した。

## 研究成果の学術的意義や社会的意義

今回開発した化学修飾法によって、市販されている(6,5)カーボンナノチューブ(SWCNT)から1000 nmから1320 nmの範囲で段階的かつ選択的に発光を発現させることに成功した。これにより、高深度・高輝度のバイオイメージングへの活用が期待される。世界に先駆けて、光通信で実装されている1300 nmの波長域で選択的に発光を発現できたことから、SWCNTのバンド構造を制御する方法を解明した学術的な意義に加えて、ナノ材料の実用面でも大きく資する研究成果となった。構造の異なるSWCNT付加体を分離することで、励起波長・発光波長の選択肢を拡張することができ、さまざまな用途への対応が可能となった。

研究成果の概要(英文)：In this project, we developed a method to control photoluminescent properties of carbon nanotubes by chemical functionalization. This makes it possible to emerge new PL in a wide range of near infrared region that can be used in bioimaging and optical communications, depending on the methods of functionalization and type of addenda. Furthermore, chiral separation of these functionalized carbon nanotubes revealed that the PL controlling by chemical functionalization is effective regardless of chiral index of carbon nanotubes. The selective use of functionalized carbon nanotubes with specific chiral indices allows selection of a wide range of excitation and emission wavelength. As a results, we achieved the goal of this project in constructing and highly purifying a near-infrared emitting carbon nanotube library.

研究分野：organic chemistry

キーワード：カーボンナノチューブ 近赤外発光 化学修飾 カイラル指数 ゲルクロマトグラフィ

### 1. 研究開始当初の背景

単層カーボンナノチューブ(SWCNT)はグラフェンシートが筒状になった構造を有しており、カイラル指数と言われるグラフェンのベクトル  $(n,m)$  を用いて一意に構造が区別される。このカイラル指数によってバンド構造が異なり、半導体型の電子構造を持つ SWCNT は固有の光吸収と近赤外発光特性を有する (図1)。近年 SWCNT の近赤外光を利用したマウスの血管造影が行われ、深度の高いリアルタイムイメージングに有効であることが報告された。また、光通信のセキュリティを向上させるために、1300 nm や 1550 nm の単一光子源が必要とされているが、極低温で作用する InAs などの量子ドットに対して、SWCNT は室温でも作用するので、汎用性を大きく高める単一光子源としても期待されている。しかしこれらの実用化研究において、発光量子収率が1%程度と低いこと、励起と発光波長の差 (ストークスシフト) が小さいために可視光で励起することができないことや発光の再吸収が起きること、吸収と発光帯が狭く選択肢が限定されることが課題とされていた。

980 nm に固有の発光をもつ(6,5)SWCNT をアリアルジアゾニウム塩( $C_6H_4XN_2^+$ )でアリアル化 (SWCNT- $C_6H_4X$ ) すると、置換基 (X) に応じて 1110 ~ 1148 nm の範囲に近赤外発光が発現することが報告された。また、(6,5) SWCNT のアルキル化によって、1100 や 1230 nm に近赤外発光が発現することが見出されている。

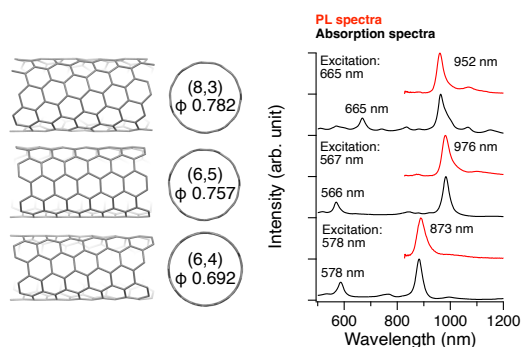


図1. SWCNT の構造と吸収・発光スペクトル。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、SWCNT の近赤外発光を、より広範囲の励起波長と発光波長に渡って制御することである。そのために、①反応剤の分子設計とそれを用いた化学修飾によって、光通信で求められる 1300 nm を含めた波長域で(6,5) SWCNT から選択的に近赤外発光を発現させること、②種々の化学反応をカイラル指数の異なる SWCNT に対して行い、励起波長の異なる SWCNT から広範囲に渡って発光を発現させて、これらを分離精製すること、③SWCNT の構造、反応剤の構造、発現する発光波長の関係性について解明し、構造と発光の関係性の知見を得ること、を検討した。

### 3. 研究の方法

(6,5)SWCNT を対象として、付加様式を制御するための反応剤を分子設計し、付加体を合成する。高高さの異なる有機リチウム試薬に組み合わせて、高高さの異なるハロゲン化アルキルを作用させたり、プロトン源としてトリフルオロ酢酸を作用させたりすることで、立体効果に基づく発光波長の制御や化学修飾率の制御を検討する。

2つの反応点を持つ試薬は、リンカーによっては位置選択的な付加反応が進行することが予想される。そこで、リンカーの鎖長の異なる反応試薬を合成し、これらに対応する反応点が1つの反応試薬を比較として SWCNT の付加反応を行う。得られた付加体の発光強度や波長からリンカーの鎖長の効果について明らかにし、SWCNT の発光特性制御の効果を解明する。

アリアルジアゾニウム塩を用いたアリアル化反応において、置換基の電子的効果はアリアル化 SWCNT の発光波長の制御に有効であることから、ペルフルオロアルカンを用いた SWCNT の化学修飾を行い、発光波長の範囲の拡張を検討する。

以上の方法にて合成した SWCNT 付加体を用いて、ゲルクロマトグラフィー充填剤と3種類の界面活性剤を組み合わせたグラジエント方式を採用して、SWCNT 付加体の分離精製を行い、カイラル指数の異なる SWCNT 付加体の発光特性を評価する。これにより、発光波長の拡張に加えて、励起波長の拡張を試みる。

#### 4. 研究成果

本研究では、種々の SWCNT 付加体を合成し、広範囲に渡り SWCNT から発現する発光波長を制御することを試みるとともに、これらの SWCNT をカイラル指数の違いにより分離することで発光波長に加えて、励起波長の拡張に成功した。以下に、具体的な成果の例を示す。

##### (1) 段階的アルキル化反応による SWCNT の発光波長の制御

SWCNT のアルキル化反応として、有機リチウム試薬とプロモアルカンを組み合わせた反応や還元剤とプロモアルカンを組み合わせた反応が知られている。(6,5)SWCNT では、前者の二段階アルキル化反応によって 1230 nm に、後者の還元的アルキル化反応では 1100 nm と 1230 nm に新たに発光が発現する。後者の場合、化学修飾率が減少することから反応性が低いことが示唆される。そのため、二段階アルキル化反応ではジアルキル化反応が優先して進行し、還元的アルキル化反応ではヒドロアルキル化反応が競争する可能性がある。これらの反応の違いが発光波長の選択性に及ぼす効果を明らかにするために、有機リチウム試薬に対して、プロモアルカンあるいはトリフルオロ酢酸を組み合わせた SWCNT の化学修飾を行った (反応式 1)。ブチルリチウムとプロモブタンを組み合わせた場合 (Bu-SWCNT-Bu) では 1230 nm に選択的に、ブチルリチウムとトリフルオロ酢酸を組み合わせた場合 (Bu-SWCNT-H) では 1100 nm が主な発光として発現した。一方、メチルリチウムとヨードメタンを組み合わせた場合 (Me-SWCNT-Me) では、1100 nm と 1230 nm の発光が同程度の強度で観察された。モデル分子を用いた理論計算の結果、Bu-SWCNT-Bu では 1,4-付加体が、Bu-SWCNT-H では 1,2-付加体が熱力学的に安定であること、置換基に依らず 1,2-付加体よりも 1,4-付加体の方がバンドギャップは小さくなることが示され、熱力学的に安定な異性体が得られると仮定すると、実験結果と良い一致を示すことがわかった (図 2)。一方、Me-SWCNT-Me では 1,2-付加体と 1,4-付加体の相対安定性に大きな差がないことも確認された。これらの反応を施した SWCNT に対して、ゲルクロマトグラフィによるカイラル指数に基づく分離精製を行い、(6,4), (7,3), (7,5), (8,3), (8,4) SWCNT 付加体の発光波長についても、明らかにすることに成功した。化学修飾によって生じる発光波長について、直径に反比例して波長シフト量が減少することが明らかとなった。

##### 反応式 1

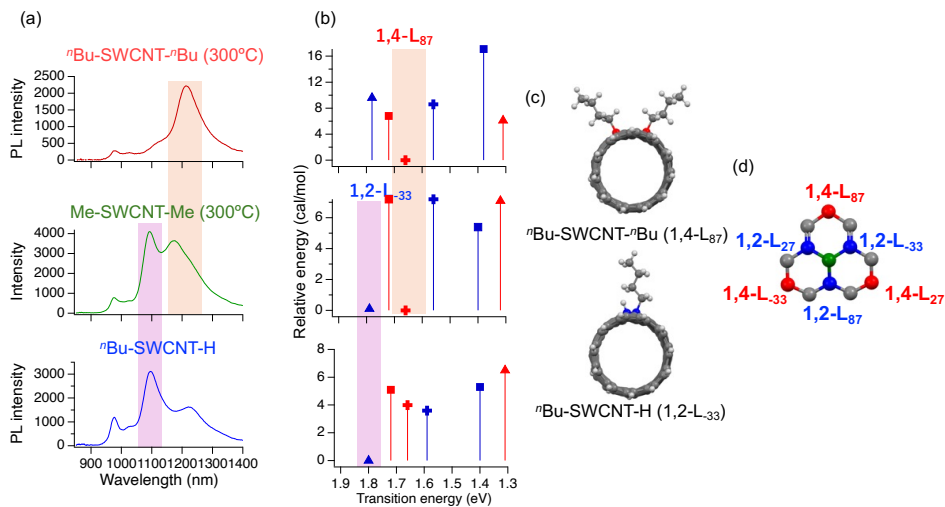
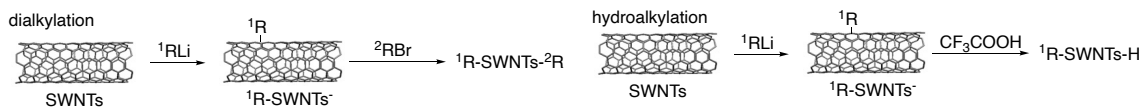


図2. (a) SWCNT 付加体の発光スペクトル. (b) 対応するモデル分子の相対安定性と LOMO-LUMO gap のエネルギーと (c) モデル分子の構造. (d) 付加様式を示すモデル図.

##### (2) アルキル鎖長と反応点による SWCNT の発光波長の制御

フラーレン C<sub>60</sub> の化学修飾において、ベンジルブロミドを用いたジベンジル化反応では、1,2-

付加体と 1,4-付加体が競争的に得られるが、1,4-ジブロモブタンを作用させると 1,2-付加体が選択的に生じる。このように反応点を 2 つ配した反応試薬は、環化付加反応によって選択的に環状付加体を与えることがある。(6,5) SWCNT の還元的アルキル化反応において、1,4-ジブロモブタンを作用させる 1230 nm に、新たに選択的な発光が発現する。環化付加反応においてリンカーの形状や長さは大変重要となることから、アルキル鎖長の異なるブロモアルカンと 1,n-ジブロモアルカンを用いた SWCNT の還元的アルキル化を行い、反応点の数とリンカーの鎖長が SWCNT の発光特性に及ぼす効果を評価した (反応式 2)。ブロモアルカンの場合、アルキル鎖長の影響は小さく、反応点近傍の嵩高さが増大すると化学修飾率が低下するなどの効果が見られた。ジブロモアルカンの場合、鎖長が 3 の場合 1215 nm、4 の場合 1230 nm に発光が生じることから、環歪みの効果が認められた。一方、鎖長が 6 以上になると、ブロモアルカンと同様に、生じる発光の選択性が低下し、2 つの発光が競争的に発現することが明らかになった (図 3)。これらの反応を施した SWCNT 付加体に対して、ゲルクロマトグラフィによるカイラル指数に基づく分離精製を行い、(6,4), (7,3), (7,5), (8,3), (8,4) SWCNT 付加体の発光波長についても明らかにすることに成功し、カイラル指数の違いによって励起波長や発光波長の選択肢を拡張できることが明らかとなった。また、化学修飾によって生じる発光波長について、直径に反比例して波長シフト量が減少することが明らかとなった。

### 反応式 2

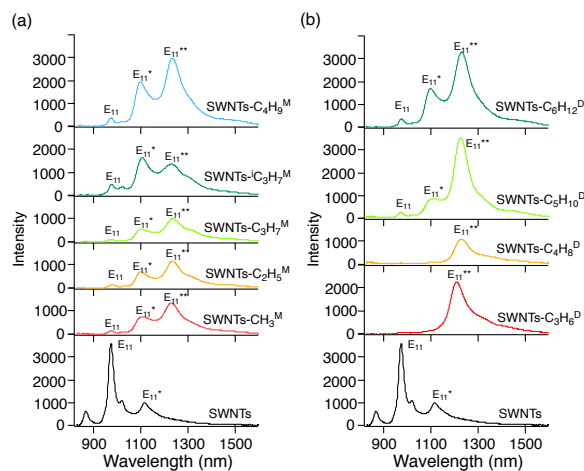
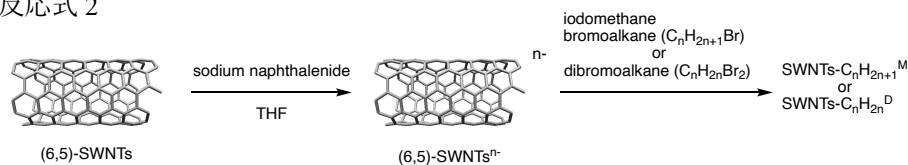


図 3. (a) ブロモアルカンを用いて合成した SWCNT 付加体と (b) ジブロモアルカンを用いて合成した SWCNT 付加体の発光スペクトル。

### (3) 環状付加反応と熱処理による SWCNT の発光波長の制御

前述の通り、ジブロモアルカンはリンカーによっては高い選択性で SWCNT の発光波長を制御することができる。例えば 1230 nm の発光は、バイオイメージング応用に適した波長と言える。反応点近傍に置換基を入れることで立体効果によって化学修飾率が制御され、結果として発光強度の調整も期待できる。一方、過剰に付加した付加基を熱処理することで部分的に脱離することで化学修飾率と発光強度の制御ができる。2,4-ジブロモペンタンで化学修飾した SWCNT を熱処理すると 1213 nm の発光が減少し、1268 nm に発光が発現することから、メチル基の効果によって付加位置が切り替わり、長波長域に新しい発光が生じたと考えられる。これらの反応を施した SWCNT 付加体に対して、ゲルクロマトグラフィによるカイラル指数に基づく分離精製を行い、(6,4), (7,3), (7,5), (8,3), (8,4) SWCNT 付加体の発光特性についても明らかにすることに成功した。カイラル指数によって、熱処理しなくても長波長域の発光が発現する SWCNT や熱処理に

よって効果的に長波長の発光が発現する SWCNT があることが明らかとなった。直径が太い SWCNT ほど脱離反応が起こりやすいことなど、カイラル指数の違いによる変化の違いが示された。モデル分子を用いた理論計算の結果、付加様式の異なる異性体間において熱力学的安定性が異なること、それぞれの HOMO-LUMO ギャップのエネルギーが異なることが示された。実験で確認された発光波長と理論計算の比較において、前述のカイラル指数の違いの影響は小さいことが確認され、また、熱処理による発光波長の変化は、熱力学的に有利な異性体への異性化の進行で説明し得ることが明らかとなった。

#### (4) フルオロアルキル化による SWCNT の発光波長の制御

これまでの研究によって SWCNT への環状付加反応を用いることで、高い選択性で長波長域に新しい発光を発現することや、反応点近傍の置換基効果によってさらに長波長に発光を発現できることがわかった。ここでは発光特性の制御に有効である環状付加反応に対して電子的効果を組み合わせ、さらに広域にわたって発光波長を拡張することを試みた。まず、ヨードボタンに対して、反応点から遠い炭素原子から順に水素原子をフッ素原子に置換していったところ、アルキル化 SWCNT の発光波長選択性が著しく向上すること、発光波長が長波長にシフトすることが示された (図 4 (a))。次に反応点を 2 つ有するパーフルオロアルカンを用いて化学反応を行ったところ、(6,5)SWCNT 付加体から 1320 nm の発光を、選択的に発現することに成功した (図 4 (b))。

モデル分子を用いた理論計算を行ったところ、アルキル鎖中の水素原子がフッ素原子に置換することによって、HOMO-LUMO ギャップが小さくなる傾向が認められ、実験で観測された PL 特性に及ぼすフッ素原子の効果を支持する結果が得られた。これらのことから、付加様式の制御および置換基の電子的効果を組み合わせることによって、SWCNT の発光特性を、これまで以上に大きく調整できることが明らかになった。

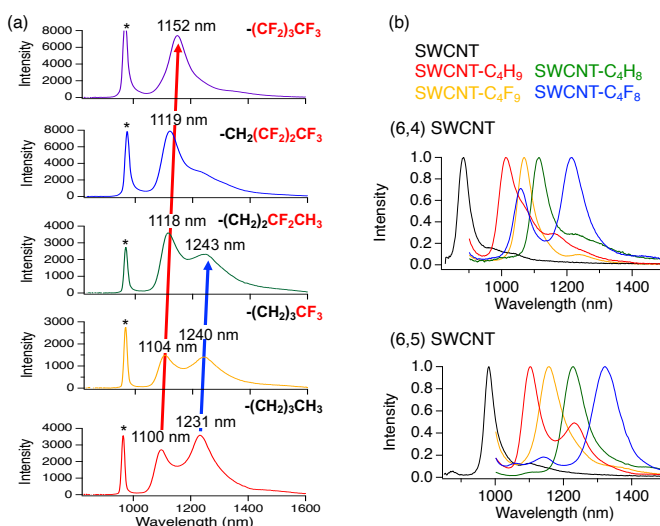


図 4. (a) アルキル化 SWCNTs 付加体の発光波長に及ぼすフッ素原子置換の効果. (b) 種々の(6,4) 及び(6,5) SWCNT 付加体の発光スペクトル. 反応試薬の違いにより発光波長が制御できる.

#### (5) まとめ

以上の一連の研究成果によって、SWCNT の発光波長を制御する因子として、付加様式と電子的効果が及ぼす影響を明らかにすることに成功した。この成果を得るにあたっては、実験に加えて、モデル分子を用いた高度な理論計算による考察の寄与が大変大きい。結果として、発光波長の制御し得る波長域を、(6,5)SWCNT においては、基の 980 nm から 1100, 1150, 1200, 1230, 1270, 1320 nm と大きく拡張することができた。この結果によって、バイオイメージングから光通信に至る波長域を満たす、広範囲において波長選択性をカバーすることに成功した。また、付加体の分離精製にも成功し、他のカイラル指数の SWCNT の発光特性制御においても、本方法論が有効であることを明らかにすることができた。この結果によって、発光波長の範囲に加えて、励起波長の選択肢も大きく拡張でき、近赤外発光材料としての SWCNT の有効性を著しく拡張することができた。これらのことから、本研究目的である、より広範囲の励起波長と発光波長に渡って制御することについて、十分に達成できたと考えられる。この成果が、SWCNT の近赤外光学材料としての実用化に資することを期待する。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Yutaka Maeda, Pei Zhao, Masahiro Ehara	4. 巻 59
2. 論文標題 Recent progress in controlling the photoluminescence properties of single-walled carbon nanotubes by oxidation and alkylation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Chem. Commun.	6. 最初と最後の頁 14497-14508
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D3CC05065C	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 Yutaka Maeda, Saeka Akita, Mitsuaki Suzuki, Michio Yamada, Takeshi Akasaka, Kaoru Kobayashi, Shigeru Nagase	4. 巻 19
2. 論文標題 Controlling the reactivity of La@C82 by reduction: reaction of the La@C82 anion with alkyl halide with high regioselectivity	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Beilstein J. Org. Chem.	6. 最初と最後の頁 1858-1866
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3762/bjoc.19.138	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 Yutaka Maeda, Yasuhiro Suzuki, Yui Konno, Pei Zhao, Nobuhiro Kikuchi, Michio Yamada, Masaya Mitsuishi, Anh T. N. Dao, Hitoshi Kasai, Masahiro Ehara	4. 巻 6
2. 論文標題 Selective emergence of photoluminescence at telecommunication wavelengths from cyclic perfluoroalkylated carbon nanotubes	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Commun. Chem.	6. 最初と最後の頁 159
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s42004-023-00950-1	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 -
1. 著者名 Yutaka Maeda, Rina Morooka, Pei Zhao, Michio Yamada, Masahiro Ehara	4. 巻 59
2. 論文標題 Control of functionalized single-walled carbon nanotube photoluminescence via competition between thermal rearrangement and elimination	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Chem. Commun.	6. 最初と最後の頁 11648-11651
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D3CC02965D	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 Yutaka Maeda, Rina Morooka, Pei Zhao, Daiki Uchida, Yui Konno, Michio Yamada, Masahiro Ehara	4. 巻 127
2. 論文標題 Controlling Near-Infrared Photoluminescence Properties of Single-Walled Carbon Nanotubes by Substituent Effect in Stepwise Chemical Functionalization	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 J. Phys. Chem. C	6. 最初と最後の頁 2360-2370
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.2c06153	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 Yui Konno, Rina Morooka, Tatsunari Morishita, Pei Zhao, Maoto Miyasaka, Kazuki Ono, Akira Noda, Daiki Uchida, Ren Iwasaki, Michio Yamada, Masahiro Ehara, Yutaka Maeda	4. 巻 27
2. 論文標題 Photoluminescence Properties of Single-Walled Carbon Nanotubes Influenced by the Tether Length of Reagents with Two Reactive Sites	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Chem. Eur. J.	6. 最初と最後の頁 e202300766
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/chem.202300766	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 Yui Konno, Michio Yamada, Mitsuaki Suzuki, Yutaka Maeda	4. 巻 27
2. 論文標題 Stepwise Functionalization of Single-Walled Carbon Nanotubes with Subsequent Molecular Conversion to Control Photoluminescence Properties	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Chem. Eur. J.	6. 最初と最後の頁 e202301797
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/chem.202301707	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 Kumar Pathak Nishant, Konno Yui, Kuan Ko Ying, Maeda Yutaka, Kobayashi Takayoshi, Yabushita Atsushi, Kanseri Bhaskar	4. 巻 565
2. 論文標題 Intermolecular vibrational energy transfer between SWCNTs with different chiralities	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 111759 ~ 111759
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.chemphys.2022.111759	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 Lu Fu-You, He Zhe-Sheng, She Nian-Zu, Yabushita Atsushi, Uchida Daiki, Maeda Yutaka, Kobayashi Takayoshi	4. 巻 553
2. 論文標題 Ultrafast electronic dynamics and vibrational dynamics of SWCNT under alkylation and annealing	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 111387 ~ 111387
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.chemphys.2021.111387	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15件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Yutaka Maeda
2. 発表標題 Functionalization of single-walled carbon nanotubes to control their near-infrared photoluminescence properties
3. 学会等名 The future belongs to supramolecular nanostructured system (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yutaka Maeda
2. 発表標題 Creation of near-infrared luminescent materials by chemical functionalization of single-walled carbon nanotubes
3. 学会等名 International Symposium for the 80th Anniversary of the Tohoku Branch of the Chemical Society of Japan (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木康浩、紺野優以、菊地展弘、山田道夫、前田優、Pei Zhao、江原正博、三ツ石方也、Anh Dao、笠井均
2. 発表標題 ブチル化単層カーボンナノチューブ付加体の化学修飾率と発光特性に及ぼすフッ素原子置換数の効果
3. 学会等名 日本化学会第104回春季年会
4. 発表年 2024年



1. 発表者名 紺野優以、山田道夫、鈴木光明、前田優
2. 発表標題 単層カーボンナノチューブの化学修飾による発光制御とアミノ基を利用した段階的な分子変換反応
3. 学会等名 第50回有機典型元素化学討論会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 前田優、鈴木康浩、菊地展弘、紺野優以、山田道夫、Pei Zhao、江原正博、三ツ石方也、Anh T. N. Dao、笠井均
2. 発表標題 ペルフルオロアルキル化によるカーボンナノチューブの光通信領域における近赤外発光の制御
3. 学会等名 第33回基礎有機化学討論会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 紺野優以、師岡里奈、Pei Zhao、内田大貴、鈴木康弘、山田道夫、江原昌弘、前田優
2. 発表標題 Relationship of Binding Configurations to Photoluminescence Properties of Functionalized Single-walled Carbon Nanotubes
3. 学会等名 第 65 回 フラールン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 前田優
2. 発表標題 化学修飾による単層カーボンナノチューブの発光特性の制御
3. 学会等名 第32回日本MRS年次大会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 前田優
2. 発表標題 化学修飾による単層カーボンナノチューブの機能化
3. 学会等名 第12回ナノカーボンバイオシンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 紺野優以、山田道夫、前田優
2. 発表標題 デンドロン修飾カーボンナノチューブの付加様式の考察
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 Yui Konno, Michio Yamada, Yutaka Maeda
2. 発表標題 Control of the photoluminescence properties of single-walled carbon nanotubes by chemical functionalization and quantification of their terminal amino groups
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 紺野優以、師岡里菜、守下達也、Pei Zhao、内田大貴、山田道夫、江原正博、前田優
2. 発表標題 反応部位を二つ有するアルキル鎖を用いた化学修飾による単層カーボンナノチューブのバンドギャップ制御
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 紺野優以、山田道夫、前田優
2. 発表標題 デンドロンを用いた単層カーボンナノチューブの化学修飾による近赤外発光制御とその末端官能基の変換
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 紺野優以、山田道夫、前田優
2. 発表標題 化学修飾による単層カーボンナノチューブの近赤外発光特性の制御と導入した官能基の変換
3. 学会等名 第31回基礎有機化学討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yutaka Maeda, Yui Konno, Hiyori Murakoshi, Haruto Tambo, Michio Yamada, Pei Zhao, Masahiro Ehara
2. 発表標題 Thermodynamic control of quantum defects on functionalized single-walled carbon nanotubes
3. 学会等名 International Conference on the Science and Application of Nanotubes and Low-Dimensional Materials (NT21) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yui Konno, Akane Nishino, Michio Yamada, Yutaka Maeda, Yuhei Miyauchi, Kazunari Matsuda, Jun Matsui, Masaya Mitsuishi, Mitsuaki Suzuki
2. 発表標題 Sonochemical reaction to control the near-infrared photoluminescence properties of single-walled carbon nanotubes
3. 学会等名 International Conference on the Science and Application of Nanotubes and Low-Dimensional Materials (NT21) (国際学会)
4. 発表年 2021年

## 〔図書〕 計2件

1. 著者名 Yutaka Maeda, Shigeru Nagase, Takeshi Akasaka	4. 発行年 2022年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 1035
3. 書名 Handbook of Fullerene Science and Technology	

1. 著者名 前田優、紺野優以、山田道夫（分担執筆）	4. 発行年 2021年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 983
3. 書名 導電性材料の設計，導電性制御および最新応用展開	

## 〔産業財産権〕

## 〔その他〕

<a href="https://kenkyu-web.u-gakugei.ac.jp/Profiles/4/0000316/detail.html?lang=ja&amp;achievement=meeting_achievement">https://kenkyu-web.u-gakugei.ac.jp/Profiles/4/0000316/detail.html?lang=ja&amp;achievement=meeting_achievement</a> <a href="https://www2.u-gakugei.ac.jp/~ymaeda/">https://www2.u-gakugei.ac.jp/~ymaeda/</a>
--

## 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

中国	National Yang-Ming Chiao-Tung University			
----	--	--	--	--