

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02573

研究課題名（和文）ナノチューブにおけるキラリティと物性

研究課題名（英文）Study on physical properties and chiralities of nanotubes

研究代表者

柳 和宏（Kazuhiro, Yanagi）

東京都立大学・理学研究科・教授

研究者番号：30415757

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究においては、カイラル構造を持つナノチューブを対象として、特に単層カーボンナノチューブ(SWCNT)および遷移金属ダイカルコゲナイドナノチューブ(TMDC-NT)を対象に、そのキラリティと物性に関わる研究を進めた。SWCNT系では、電気化学ドーピングと円偏光二色性測定を組み合わせ、キャリア注入によるトリオンによる新たな円偏光二色性を見出すことに成功した。またエナンチオマー分離したSWCNTからの発光における円偏光二色性を世界ではじめて捉えることに成功した。TMDC-NT系においては、合成技術を発展させ、小直径のWS<sub>2</sub>ナノチューブの合成やMoS<sub>2</sub>/WS<sub>2</sub>ヘテロナノチューブの合成に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自然界においては様々なもので右巻き・左巻きの構造をもつものがあり、ナノの構造においても、特にナノのチューブ構造において、それが螺旋構造をもつことにより右巻き・左巻きがあります。これをキラリティと呼びます。このキラリティに由来して、物質の対称性が崩れ、結果として高効率な光電変換など新たな物性が予想されています。本研究では、その基礎研究として、キラリティに由来する新たな光物性や、またより対称性の破れを顕著にするための合成技術の開発を進めました。

研究成果の概要（英文）：In this study, we investigated the relationships between chiral structures and physical properties of nanotubes such as single walled carbon nanotubes (SWCNT) and transition metal dichalcogenide nanotubes (TMDC-NT). In the SWCNTs, we developed a technique to combine the electrolyte gating and CD measurements, and investigated the influence of carrier injection on the CD spectra of enantiomer sorted SWCNTs. We found the CD spectra of trions in this study. In addition, we found circular polarized photoluminescence from enantiomer sorted SWCNTs. Regarding the TMDC-NT, we advanced synthesis techniques. We succeeded to prepare WS<sub>2</sub> nanotubes with relatively small diameters, and to synthesize hetero-structured nanotubes such as MoS<sub>2</sub>/WS<sub>2</sub> nanotubes.

研究分野：ナノ構造物理

キーワード：ナノチューブ 単層カーボンナノチューブ 遷移金属ダイカルコゲナイドナノチューブ 円偏光二色性  
円偏光発光 小直径合成 ヘテロナノチューブ

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

層状化合物の物質群の一つとして、その二次元のシート構造をチューブ構造にまるめたナノチューブ構造を持つ材料群がある。例えば、二次元のグラフェンの二次元シートを一巻にした単層カーボンナノチューブ (SWCNT) や、遷移金属ダイカルコゲナイドの二次元シートを巻いた遷移金属ダイカルコゲナイドナノチューブ (TMDC-NT) である。このナノチューブ構造を持つ物質群においては、右巻き・左巻きの鏡像対称性を備えたカイラル構造をもつものがある。カイラル構造を持つ場合、そのキラリティ性を反映した円偏光特性を生じ、またその対称性の破れから、非相反伝導・バルク光電変換といった、特異な物性が見出されることが知られている。近年、SWCNT の分野においては、エナンチオマー分離技術が進展し、電子構造は同じであるが右巻き・左巻きの鏡像対称性が異なる試料がマクロに得られるようになり、キラリティに由来する新たな物性探索がはじまりつつある。一方、二硫化タングステンナノチューブ (WS<sub>2</sub>-NT) に代表される遷移金属カルコゲナイドナノチューブ (TMDC-NT) においては、直径が 100nm 程のという直径が大きな試料の大量合成手法は確立されているが、構造に由来する物性が顕著となる 10nm 以下のナノチューブの合成手法は未だに確立されていない状況にあった。このようにナノチューブ構造を有する物質群として、SWCNT や TMDC-NT が挙げられるが、物性研究に利用可能な試料の構造制御の状態が大きくことなる状況にあった。

### 2. 研究の目的

本研究では、ナノチューブ物質群におけるキラリティと物性との関係を実験的に解き明かすことを目的として、SWCNT 系および TMDC-NT 系の二つを対象として、それぞれ次の課題に関して焦点を当てて研究を行った。SWCNT 系においては、エナンチオマー分離が可能となり、右手系・左手系に由来する円偏光二色性を調べることが可能となっている。近年、理論的に高密度キャリア注入により巨大な円偏光二色性が生じることが予想されている。よって、SWCNT 系においては、エナンチオマー分離した (6,5) およびその鏡像対称である (11,-5) SWCNT における円偏光二色性のキャリア注入依存性を中心に、新たな円偏光二色性応答を明らかにすることを目的に研究を行った。また TMDC-NT に関しては、キラリティ性に由来する空間反転対称性の破れがより顕著になるような物質開発を目指し、合成手法を進展させることを主目的に研究を進めた。現在、報告されている大量合成法で得られる TMDC-NT の直径は 100nm 程であり、それではカイラル構造と物性との関係を議論することは困難である。構造との議論がより可能となり、また、対称性の破れが顕著となる、直径の小さな TMDC-NT の合成やヘテロ化といった合成技術を進展させることを目的に研究を行った。

### 3. 研究の方法

#### (1) SWCNT 系

以下の二つの研究課題に関するそれぞれの研究方法について記述する。

課題 S-1 : エナンチオマー分離されたキラルな SWCNT の円偏光二色性の電気化学ドーピング特性

課題 S-2 : キラルな SWCNT の円偏光発光特性

#### 課題 S-1 : エナンチオマー分離されたキラルな SWCNT の円偏光二色性の電気化学ドーピング特性

(6,5) の鏡像対称である (11,-5) SWCNT をゲル濾過カラムクロマトグラフィー法で分離精製を行い、得られた試料を本研究で整備した円偏光二色性分散計で純度評価を行う。メンブレンフィルター上にランダムに SWCNT がネットワークを形成した薄膜を用意し、電極を形成したガラス基板上に転写を行う。ランダムに配向した薄膜を用意した理由は後述する。市販の円偏光二色性分散計の試料室を改良し、電極端子および不活性ガス (Ar ガスなど) を導入できる形にし、イオンゲルを用いた電気化学ドーピングを行い、円偏光二色性のキャリア注入依存性を計測した。

#### 課題 S-2 : キラルな SWCNT の円偏光発光特性

エナンチオマー分離を行った (6,5) および (11,-5) SWCNT 分散液、およびエアロゾルジェットプリンティングで形成した薄膜における発光の円偏光二色性を、四分の 1 波長板および、直線偏光子

を組み合わせ評価した。また薄膜にソース・ドレイン電極、および HfO<sub>2</sub> 絶縁層を形成した後トップゲート電極を形成し、電流注入による発光の円偏光二色性も同様に評価を行った。

## (2) TMDC-NT 系

以下の二つの研究課題に関するそれぞれの研究方法について記述する。

課題 T-1 : 小直径の WS<sub>2</sub> ナノチューブの合成とその光学特性

課題 T-2 : MoS<sub>2</sub>/WS<sub>2</sub> ヘテロナノチューブの合成

### 課題 T-1 : 小直径の WS<sub>2</sub> ナノチューブの合成とその光学特性

はじめに化学気相法で WO<sub>x</sub> ナノワイヤを合成した後、硫化により WS<sub>2</sub> ナノチューブを作成する。小直径のナノチューブを合成する為に、直径の細いナノワイヤの合成を行う。得られた試料はメタノールに分散し、光吸収・発光特性の評価を行った。

### 課題 T-2 : MoS<sub>2</sub>/WS<sub>2</sub> ヘテロナノチューブの合成

はじめに課題 T-1 と同様に WS<sub>2</sub> ナノチューブの合成を行う。その後、WS<sub>2</sub> ナノチューブの外側にモリブデン金属もしくは酸化モリブデンの蒸着を行い、その後、硫化により MoS<sub>2</sub>/WS<sub>2</sub> ヘテロ構造を有するヘテロナノチューブの合成を行った。

## 4. 研究成果

### (1) SWCNT 系

課題 S-1 : エナンチオマー分離されたキラルな SWCNT の円偏光二色性の電気化学ドーピング特性

はじめにエナンチオマー分離された(6,5)および(11,-5)の薄膜において適切に円偏光二色性(CD)が計測できるかの検証を行った。当初は、配向した薄膜を用いていたが、直線偏光特性が偽の CD 信号を生じることを把握した。直線偏光特性と CD 信号との関係を調べ、直線偏光成分が 0.01 以下であると、偽の信号が無視できる程度に小さく、試料由来の CD を議論できることを明らかにした。よって、薄膜試料作成の段階から、意図的に無配向(ランダム配向)になるような薄膜作成を行った。利用した試料は、E22 遷移に由来する光吸収強度と、E22 遷移の CD シグナル強度から、エナンチオマー純度 90%以上のものを(6,5)および(11,-5)の両方で利用した。これら全て、ゲル濾過クロマトグラフィー法を用いて、自ら精製を行った。

同試料に対してイオンゲルを用いて電気化学的ドーピングを行い、(11,-5)カイラルの SWCNT における CD スペクトルのキャリア注入による変化を明らかにした。図 1 に CD スペクトルのキャリア注入依存性を示す。ゲート電圧を変化させ、電子・ホールキャリア注入を行うことにより、ナノチューブの van Hove 特異点に由来する光吸収ピークは低エネルギー側からなくなる。それと共に、CD シグ

ナルの減少も見出した。特に、E<sub>11</sub> 近傍の振る舞いに注目すると、電子・ホールキャリア注入とともにトリオン(荷電励起子)

に由来する光吸収ピークの形成が見られ、同時にトリオンに由来する CD 信号が現れることも世界ではじめて見出した。トリオンに由来する CD 信号の符号は、E<sub>11</sub> 励起子のものと同様に(11,-5)では正符号であり、そのことは定性的にトリオンが E<sub>11</sub> 励起子にドーピングした電荷が結合することに由来する背景と一致する。また(11,-5)だけでなく、鏡映対称の(6,5)SWCNT に対しても同様な実験を行った。(6,5)SWCNT では E<sub>11</sub> の CD 信号は負であるが、トリオンに由来する信号も負であることが分かり、得られた結果が一致することを確認した。以上の結果は、現在、紙上発表に向けて準備中である。

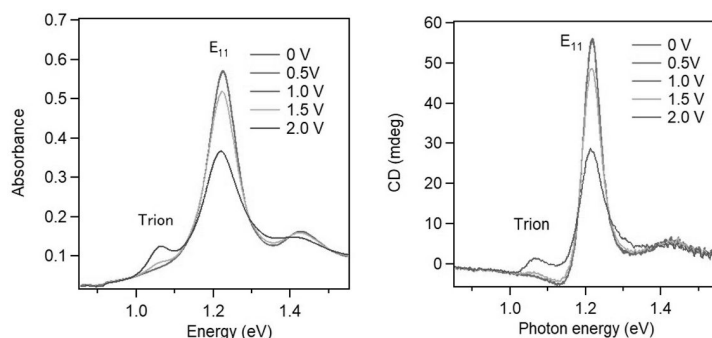


図1 電気化学ドーピングによる電子注入(正の電圧)による光吸収変化と CD スペクトル変化。トリオンに由来する光吸収構造の形成と、CD スペクトルにおけるピーク構造の発現が見いだされる。

以上の結果は、現在、紙上発表に向けて準備中である。

## 課題 S-2 : キラルな SWCNT の円偏光発光特性

これまでエナンチオマー分離を行った試料において光吸収における円偏光二色性については数多く報告されてきた。しかしながら発光の円偏光二色性はこれまで見いだされてこなかった。本研究では、高純度にエナンチオマー分離精製を行った試料に対して、近赤外領域における円偏光二色性を検出する光学系を整備することにより、図2のように発光における円偏光二色性を検出することが可能であることを見出した。特に、鏡像対称にある(6,5)および(11,-5)の両者で、円偏光の正負が反転し、またラセミ体においては円偏光特性がほぼ見えないことから、SWCNTの発光帯である近赤外領域において円偏光特性を検出することが可能であることが示唆されている。また、電流注入による発光においても円偏光二色性が検出されており、カイラル構造を備えるナノチューブを用いることで電流注入円偏光発光が可能であることが示唆されている。

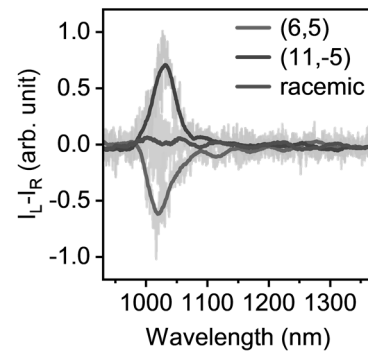


図2 エナンチオマー分離した(6,5)および(11,-5)の発光の円偏光二色性

## (2) TMDC-NT系

### 課題 T-1 : 小直径の WS<sub>2</sub> ナノチューブの合成とその光学特性

TMDC-NTにおけるカイラル構造による対称性の破れを顕著のものとするには、そもそも直径の小さなNT合成を進める必要があった。一般的に大量合成されているWS<sub>2</sub>ナノチューブの直径は100nm程である。本研究では小直径のWS<sub>2</sub>ナノチューブの合成法の確立を目指した。WS<sub>2</sub>ナノチューブを合成するには、WO<sub>x</sub>ナノワイヤをはじめに合成し、それを硫化する手法が一般的である。よって、小直径のWS<sub>2</sub>ナノチューブを合成する為には、直径の細いWO<sub>x</sub>ナノワイヤの合成、更には硫化条件の最適化が必要である。WO<sub>x</sub>ナノワイヤの合成する手法として、水熱法と化学気相法の二つのアプローチがある。初めに水熱法で合成したナノワイヤの合成条件の最適化や硫化条件の最適化から比較的直径の小さなWS<sub>2</sub>ナノチューブを得ることに成功したが、硫化の反応温度が高く(800程)また反応温度範囲が非常に狭く、結晶構造の良いナノチューブを得ることは困難な状況にあった。また水熱法で作成したナノワイヤは、個々のナノワイヤが分子間力で束になったバンドル構造を形成し易く、800という硫化条件においては、バンドルそのものが一つの結晶体として硫化され、個々のナノワイヤの直径が5nm程であったとしても、結果として直径が20nm程のナノチューブとなることが分かった。よって個々のバンドルを小さくするため、ポリエチレングリコール(PEG)を用いてバンドルをほどいて硫化するアプローチも行ったが、顕著な直径の減少は見られなかった。そこでCVD法によるナノワイヤの合成および硫化に取り組み、合成条件の最適化により、最終的に平均直径が10nm程のWS<sub>2</sub>ナノチューブを合成することに成功した。得られた試料を用いて、直径が100nm程のWS<sub>2</sub>ナノチューブ、およびWS<sub>2</sub>のフレークの光吸収スペクトルおよび発光スペクトルの比較を行った。その結果、小直径のWS<sub>2</sub>ナノチューブにおいて顕著な発光ピーク位置が低エネルギー側へのシフトが見いだされ、このことは直径の小さなナノチューブにおけるバンドギャップが狭まる振る舞いが見いだされたものと考えられる。

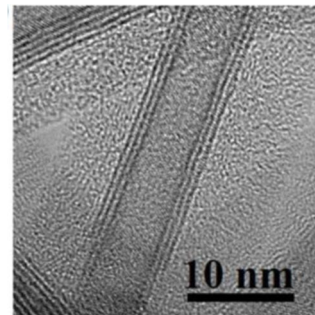


図3 小直径(~10nm)のWS<sub>2</sub>ナノチューブの合成

#### 課題 T-2 : MoS<sub>2</sub>/WS<sub>2</sub> ヘテロナノチューブの合成

カイラル構造に由来するユニークな物性は対称性の破れに起因する。WS<sub>2</sub> ナノチューブにおいて対称性が破れた構造をより顕著にすることを目的として、WS<sub>2</sub> ナノチューブの外側に異なる遷移金属ダイカルコゲナイド層を形成するヘテロナノチューブ構造を創出することを行った。前述の CVD で作成した WS<sub>2</sub> ナノチューブに対して、Mo 金属や酸化モリブデンを蒸着し、それを硫化することによるヘテロ構造作成を行った。合成条件を最適化することにより、MoS<sub>2</sub>/WS<sub>2</sub> のヘテロナノチューブ構造を形成することに成功した。酸化モリブデンを用いた場合は、外側の MoS<sub>2</sub> 層の結晶性が良く図 4 のような

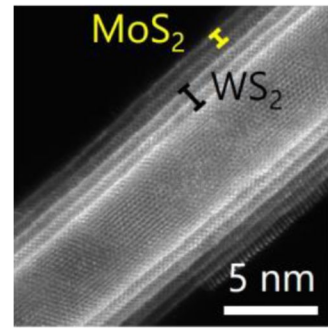


図 4 MoS<sub>2</sub>/WS<sub>2</sub> のヘテロナノチューブの合成

以上のように、本研究においては、右手系・左手系のカイラル構造を持つナノチューブを対象として、SWCNT 系と TMDC-NT 系を対象として、その物質創製と物性研究を進めた。SWCNT 系においては、電気化学ドーピングと円偏光二色性測定を組み合わせた実験系を構築し、キャリア注入によるトリオンによる新たな円偏光二色性を見出すことに成功した。但し、理論的に予想されている巨大な円偏光二色性は、見出すことはできず、その背景の一つとして、注入キャリア量が足りなかったことが挙げられる。その為には、嫌気化条件では無く、真空条件での測定が必要となり、現在、更なる測定系開発を進めている。しかしながら、本研究においてトリオンにおける円偏光特性を見出せたことは基礎科学の観点から重要な一歩と考えている。また SWCNT からの発光における円偏光二色性を世界ではじめて捉えることに成功した。鏡像対称である (6, 5) および (11, -5) における円偏光二色性発光の符号の反転も確認している。近赤外領域における円偏光二色性発光のはじめての例と言え、分子系ではなく 共役が非常に広がった SWCNT 系ならではの特性を見出すことに成功した。SWCNT の特性を生かし、電流注入発光での円偏光の偏りもあることも明らかにしており、今後、円偏光発光デバイスに繋がると考えられる。TMDC-NT 系においては、カイラル構造に由来する反転対称性の破れをより顕著にさせる為、小直径の NT の合成や、ヘテロ化といった合成技術を発展させることを行った。実際に、直径 10nm 程の WS<sub>2</sub> ナノチューブの合成や MoS<sub>2</sub>/WS<sub>2</sub> ヘテロナノチューブの合成に成功した。特に、直径 10nm 程の小直径の WS<sub>2</sub> ナノチューブにおいては、多層ナノチューブである為、最も内側のナノチューブの直径は 3nm 程になるものもあり、結果として、発光のピーク位置の低エネルギーシフトを見出すことに成功した。これは、直径が小さくなるとバンドギャップが小さくなる振る舞いとなっていることを示唆しており、通常ナノ物質構造の振る舞いとは大きく異なる。通常ナノ物質においては、直径が小さくなり、量子閉じ込め効果が強くなると、バンドギャップは広がる。一方、TMDC-NT では、格子歪に由来して、バンドギャップが狭まることが予想されており、そのような振る舞いを小直径の WS<sub>2</sub>NT の合成およびその発光特性を明らかにすることで突き止めることができたと考えている。また、半導体 - 半導体での一次元ヘテロナノチューブ構造にも成功した。今後、反転対称性の破れに由来する新たな物性が更に見いだされるものと期待されている。このように、ナノチューブのキラリティと物性という研究テーマで、ナノチューブ系 (SWCNT 系および TMDC-NT 系) におけるキラリティに関わる分離精製や物質創製、およびその物性の理解、特に光学特性に関連した物性の理解を深めた。本研究支援により、円偏光二色性分散計や、合成炉、分離精製用のカラムなど、ナノチューブ系のキラリティと物性との関係を明らかにする上で必要不可欠な研究環境を整えることを達成し、また多くの知見を得て、技術開発を進めることを達成した。本研究で得られた知見・技術に基づいて更にナノチューブのカイラル構造に由来する新たな物性探索・デバイス応用を進めていきたいと考えている。

## 5. 主な発表論文等

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

|  |                               |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Yomogida Yohei, Horiuchi Kanako, Okada Ryotaro, Kawai Hideki, Ichinose Yota, Nishidome Hiroyuki, Ueji Kan, Komatsu Natsumi, Gao Weilu, Kono Junichiro, Yanagi Kazuhiro | 4. 巻<br>12                    |
| 2. 論文標題<br>Hall effect in gated single-wall carbon nanotube films  | 5. 発行年<br>2022年               |
| 3. 雑誌名<br>Scientific Reports   | 6. 最初と最後の頁<br>1-7             |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1038/s41598-021-03911-7   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する                  |
| 1. 著者名<br>Yuan Wenyu, Ueji Kan, Yagi Takashi, Endo Takahiko, Lim Hong En, Miyata Yasumitsu, Yomogida Yohei, Yanagi Kazuhiro  | 4. 巻<br>15                    |
| 2. 論文標題<br>Control of Thermal Conductance across Vertically Stacked Two-Dimensional van der Waals Materials <i>via</i> Interfacial Engineering                                   | 5. 発行年<br>2021年               |
| 3. 雑誌名<br>ACS Nano   | 6. 最初と最後の頁<br>15902 ~ 15909   |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1021/acsnano.1c03822  | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |
| 1. 著者名<br>Rahman Md. Ashiqur, Yomogida Yohei, Nagano Mai, Tanaka Ryoga, Miyata Yasumitsu, Yanagi Kazuhiro  | 4. 巻<br>60                    |
| 2. 論文標題<br>Improved synthesis of WS <sub>2</sub> nanotubes with relatively small diameters by tuning sulfurization timing and reaction temperature                               | 5. 発行年<br>2021年               |
| 3. 雑誌名<br>Japanese Journal of Applied Physics  | 6. 最初と最後の頁<br>100902 ~ 100902 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.35848/1347-4065/ac2013  | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |
| 1. 著者名<br>Yomogida Yohei, Nagano Mai, Hamasaki Hiromu, Hirahara Kaori, Miyata Yasumitsu, Yanagi Kazuhiro   | 4. 巻<br>60                    |
| 2. 論文標題<br>Synthesis of relatively small-diameter tungsten ditelluride nanowires from solution-grown tungsten oxide nanowires  | 5. 発行年<br>2021年               |
| 3. 雑誌名<br>Japanese Journal of Applied Physics  | 6. 最初と最後の頁<br>SCCD02 ~ SCCD02 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.35848/1347-4065/abe201  | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |

|   |                   |
|---|-------------------|
| 1. 著者名<br>Komatsu Natsumi, Ichinose Yota, Dewey Oliver S., Taylor Lauren W., Trafford Mitchell A., Yomogida Yohei, Wehmeyer Geoff, Pasquali Matteo, Yanagi Kazuhiro, Kono Junichiro | 4. 巻<br>12        |
| 2. 論文標題<br>Macroscopic weavable fibers of carbon nanotubes with giant thermoelectric power factor   | 5. 発行年<br>2021年   |
| 3. 雑誌名<br>Nature Communications   | 6. 最初と最後の頁<br>1-8 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1038/s41467-021-25208-z  | 査読の有無<br>有        |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する      |

|  |                               |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Ueji Kan, Matsuoka Yuya, Yagi Takashi, Yomogida Yohei, Ichinose Yota, Yoshida Akari, Yanagi Kazuhiro     | 4. 巻<br>117                   |
| 2. 論文標題<br>In situ time-domain thermoreflectance measurements using Au as the transducer during electrolyte gating | 5. 発行年<br>2020年               |
| 3. 雑誌名<br>Applied Physics Letters  | 6. 最初と最後の頁<br>133104 ~ 133104 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1063/5.0023524  | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |

|  |                     |
|--|---------------------|
| 1. 著者名<br>Ichinose Yota, Matsubara Manaho, Yomogida Yohei, Yoshida Akari, Ueji Kan, Kanahashi Kaito, Pu Jiang, Takenobu Taishi, Yamamoto Takahiro, Yanagi Kazuhiro | 4. 巻<br>5           |
| 2. 論文標題<br>One-dimensionality of thermoelectric properties of semiconducting nanomaterials   | 5. 発行年<br>2021年     |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review Materials  | 6. 最初と最後の頁<br>25404 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/PhysRevMaterials.5.025404  | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>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<br>-           |

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Yomogida Yohei, Nagano Mai, Hamasaki Hiromu, Hirahara Kaori, Miyata Yasumitsu, Yanagi Kazuhiro                      | 4. 巻<br>60                    |
| 2. 論文標題<br>Synthesis of relatively small-diameter tungsten ditelluride nanowires from solution-grown tungsten oxide nanowires | 5. 発行年<br>2021年               |
| 3. 雑誌名<br>Japanese Journal of Applied Physics   | 6. 最初と最後の頁<br>SCCD02 ~ SCCD02 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.35848/1347-4065/abe201   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Yomogida Yohei, Kainuma Yoshiki, Endo Takahiko, Miyata Yasumitsu, Yanagi Kazuhiro | 4. 巻<br>116                   |
| 2. 論文標題<br>Synthesis and ambipolar transistor properties of tungsten diselenide nanotubes   | 5. 発行年<br>2020年               |
| 3. 雑誌名<br>Applied Physics Letters   | 6. 最初と最後の頁<br>203106 ~ 203106 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1063/5.0005314   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |

|  |                           |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名<br>Komatsu Natsumi, Nakamura Motonori, Ghosh Saunab, Kim Daeun, Chen Haoze, Katagiri Atsuhiro, Yomogida Yohei, Gao Weilu, Yanagi Kazuhiro, Kono Junichiro | 4. 巻<br>20                |
| 2. 論文標題<br>Groove-Assisted Global Spontaneous Alignment of Carbon Nanotubes in Vacuum Filtration   | 5. 発行年<br>2020年           |
| 3. 雑誌名<br>Nano Letters   | 6. 最初と最後の頁<br>2332 ~ 2338 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1021/acs.nanolett.9b04764   | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>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<br>-                 |

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 9件)

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Yuuya Hosokawa  |
| 2. 発表標題<br>Circular dichroism spectra of Helicity-sorted Single-wall Carbon Nanotubes with Controlled Chemical Potential |
| 3. 学会等名<br>The 61st Fullerene-Nanotube-graphene symposium (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2021年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>MD ASHIQUR RAHMAN  |
| 2. 発表標題<br>Synthesis of relatively small-diameter WS <sub>2</sub> nanotubes by sulfurization of poly(ethylene glycol) treated thin tungsten oxide nanowires |
| 3. 学会等名<br>応用物理学会 第69回 応用物理学会 春季学術講演会   |
| 4. 発表年<br>2022年   |



|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Mai Nagano  |
| 2. 発表標題<br>Synthesis of Hetero Transition Metal Dichalcogenide Nanotubes |
| 3. 学会等名<br>The 62nd fullerene-Nanotube-graphene symposium (国際学会)         |
| 4. 発表年<br>2022年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Md. Ashiqur Rahman  |
| 2. 発表標題<br>Improved synthesis of WS <sub>2</sub> nanotubes with relatively small diameters by tuning sulfurization timing and reaction temperature |
| 3. 学会等名<br>MNC2021 (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2021年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>逢田陽平                            |
| 2. 発表標題<br>遷移金属カルコゲナイドナノチューブの合成・精製とその応用    |
| 3. 学会等名<br>応用物理学会 第69回応用物理学会春季学術講演会 (招待講演) |
| 4. 発表年<br>2022年                            |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Yohei Yomogida, Ryoga Tanaka, Mai Nagano, Yasumitsu Miyata and Kazuhiro Yanagi                           |
| 2. 発表標題<br>Synthesis of 1D Transition-Metal Dichalcogenides by Chalcogenization of Transition-Metal Oxide Nanowires |
| 3. 学会等名<br>33rd International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2020) (国際学会)                        |
| 4. 発表年<br>2020年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Yuuya Hosokawa, Yohei Yomogida, Kazuhiro Yanagi  |
| 2. 発表標題<br>Circular dichroism spectra on thin films of Helicity Selected Single-wall Carbon Nanotubes |
| 3. 学会等名<br>The 60th Anniversary Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium (国際学会)                |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Ryoga Tanaka, Yohei Yomogida, Yasumitsu Miyata, Kazuhiro Yanagi                     |
| 2. 発表標題<br>Synthesis of NbSe <sub>2</sub> nanowires by selenization of niobium oxide nanowires |
| 3. 学会等名<br>The 59th Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium (国際学会)                     |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Ryoga Tanaka, Yohei Yomogida, Yasumitsu Miyata, Kazuhiro Yanagi          |
| 2. 発表標題<br>High-yield synthesis of MoS <sub>2</sub> and MoSe <sub>2</sub> nanotubes |
| 3. 学会等名<br>The 60th Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium (国際学会)          |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Mai Nagano, Yohei Yomogida, Yasumitsu Miyata, and Kazuhiro Yanagi           |
| 2. 発表標題<br>Tellurization of solution-synthesized tungsten oxide nanowires              |
| 3. 学会等名<br>The 59th Anniversary Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Mai Nagano, Yohei Yomogida, Hiromu Hamasaki, Kaori Hirahara, Yasumitsu Miyata, Kazuhiro Yanagi  |
| 2. 発表標題<br>Synthesis of WTe <sub>2</sub> nanowires by tellurization of tungsten oxide nanowires and origin of non-formation of tubular structure |
| 3. 学会等名<br>The 60th Anniversary Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2021年  |

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

|                                    |                          |               |
|------------------------------------|--------------------------|---------------|
| 産業財産権の名称<br>遷移金属カルコゲナイドナノチューブの製造方法 | 発明者<br>蓬田陽平、柳和宏、<br>田中涼雅 | 権利者<br>同左     |
| 産業財産権の種類、番号<br>特許、特願2021- 25512    | 出願年<br>2021年             | 国内・外国の別<br>国内 |

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

|           | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                       | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)              | 備考 |
|-----------|---|------------------------------------|----|
| 研究<br>分担者 | 蓬田 陽平<br><br>(Yomogida Yohei)<br><br>(90647158) | 東京都立大学・理学研究科・助教<br><br><br>(22604) |    |

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 |
|---------|---------|