

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 8 月 24 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01708

研究課題名（和文）引張強度6GPaを超える超高強度・超軽量カーボンナノチューブ紡績系の創製

研究課題名（英文）Development of ultra high strength more than 6GPa ultra light weight carbon nanotube spun yarn

研究代表者

林 靖彦（HAYASHI, Yasuhiko）

岡山大学・自然科学研究科・教授

研究者番号：50314084

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 20,750,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、基板の合成した長尺・高密度の数層カーボンナノチューブ（CNT）フォレストから、乾式で紡績法によりCNT長繊維を作製し、実用上ベンチマークとなる炭素繊維の強度を超える引張強度のCNT長繊維の実現を目指した。室温からCNT合成初期の温度までの触媒金属粒子の形状変化を明らかにし、2層CNTを選択的に合成することが可能となった。そして、真空および極薄エタンガス中でCNT長繊維全体に通電加熱することで、残留するアモルファスカーボンの除去とグラフェンへの構造変化が同時に起こっていることを明らかにした。さらにCNT繊維を一方に配向させる紡績系技術により、2.5GPaを超える高強度が実現できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、基板に垂直配向した長尺・高密度カーボンナノチューブ（CNT）フォレストを合成し、この基板から乾式紡績法によりCNT長繊維を作製し、その高強度化する手法を開発するものである。高強度で超軽量の特性を併せ持つCNT紡績系が実現できると、炭素繊維強化プラスチック（CFRP）代替への応用が期待される。実用途の輸送機器用材料は、温室効果ガス削減のため、軽量化と高強度化が求められており、高強度CNT長繊維の実現は社会、産業基盤へ大きく貢献する。

研究成果の概要（英文）：In this study, carbon nanotube (CNT) yarns were fabricated from tall and high-density, few-walled CNT forest synthesized on the substrate by dry spinning method to achieve CNT yarns with tensile strength exceeding the strength of carbon fibers, which is a benchmark for practical use. The shape and diameter change of the catalytic metal particles from room temperature to the initial temperature of CNT synthesis was clarified, which enabled the selective synthesis of double-layer CNTs. We also found that the removal of residual amorphous carbon and the structural change to graphene occurred simultaneously when the entire CNT yarn was heated by joule heating in vacuum and extreme ethane gas. Furthermore, by using a spinning technique to orient the CNTs in one direction, a high strength of over 2.5 GPa was achieved.

研究分野：ナノ材料・ナノ物性

キーワード：カーボンナノチューブ（CNT）紡績系 乾式紡績 熱化学気相成長（CVD） 2層CNT 高強度 加熱処理

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

カーボンナノチューブ(CNT)は、炭素のみで構成される直径が数ナノメートルのチューブ材料であり、特に、100 GPa 以上の非常に高い破断強度(ヤング率: 1TPa)と軽量性(1.3 g/cm³)、柔軟性といった特徴を有していることから、現在急速に実用化が進んでいる炭素繊維を代替する次世代の高強度繊維としての利用が期待されている。ナノスケールのCNTを無数に束ねたマクロスケールのファイバー状紡績系を作製することで、取り扱いの困難さや個々のCNT品質のばらつき改善につながり、実用化の可能性を大きく広げることができる。

このようななか、研究代表者等は、長尺・高密度2層カーボンナノチューブ(2層CNT)の選択合成に世界に先駆けて成功し、ドライプロセスで基板から連続的に引き出し組状に撚る2層CNT長繊維技術を確立し(図1を参照)、この長繊維に通電加熱することで引張強度を高め2GPa(従来800MPa)を達成している。

実用上ベンチマークとなる炭素繊維の強度は、1950年代から続く長年の研究により最大引張破断応力が6GPaまで引き上げられてきたが、近年では強度向上や低コスト化は頭打ちとなってきており、新規材料の開発が求められている。このため、炭素繊維代替材料として、CNT紡績系に注目が集まっている。CNT紡績系を実現するためには、単一CNTの高い引張強度を維持しつつ、マクロスケールのCNT紡績系にスケールアップし6GPaの破断応力を凌駕することが求められている。

実用途の輸送機器用材料は、温室効果ガス削減のため、軽量化と高強度化が求められており、本研究では、高強度炭素繊維の引張強度に匹敵する未踏の6GPaを目標とし、CNT長繊維を複数束ねたCNT紡績系の高強度化に取り組んだ。

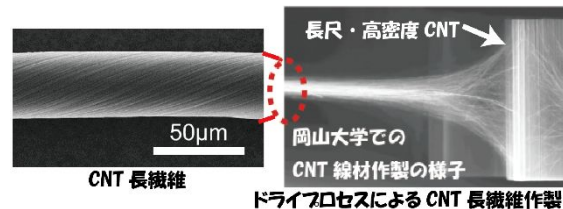


図1. 典型的なCNT紡績系およびドライプロセスによるCNT紡績系の作製

2. 研究の目的

本研究では、ナノ材料の物性を維持しバルク材料まで引き上げる「マルチスケール材料工学」分野に相当するCNT紡績系で高強度を実現する。このため、高強度化に理想的な構造の2層CNTの選択性を高める合成モデルの提案、単一CNT長繊維を炭化水素ガス中で通電加熱し、CNTの内部欠陥で発生するジュール熱で分解する炭素原子・分子により、欠陥の間をち密に結合する「欠陥修復過程」を積極的に活用するナノカーボン・ネットワーク技術の開拓、CNT長繊維界面の有効な荷重伝達効果を明らかにし、それを制御する新規CNT紡績技術を確立することで、目標値達成への指針を提案する。

これらの研究を実施することで、理想的なCNTの選択合成技術、CNT長繊維を構成するCNT間を「つなぐ」欠陥修復技術、CNT紡績系内の荷重伝達やすべり応力の解明と制御技術、が確立される。

3. 研究の方法

乾式紡績可能な長尺・高密度のCNTフォレストを合成するためには、成長の経過とともに進行する触媒粒子の失活を抑制する必要がある。本研究では、Al₂O₃/SiO₂/Si基板上に蒸着により極薄膜Feを形成した。Fe薄膜を成膜した基板を熱化学気相成長(CVD)装置内に導入し、150°Cで10分間加熱し水分等の付着物を除去する。設定した粒子化温度(350-500°C)まで昇温し、水素雰囲気下で5分間加熱することで鉄の還元とナノ粒子化を促す(粒子形成ステージ)。その後、炭素源となるアセチレンガス100 sccmと還元ガスである水素ガス1000 sccm、キャリアガスである窒素ガス1000 sccmを合成チャンバ内に導入し、チャンバの全圧が15 mbarとなるように調整した。ガス導入開始とともに、設定した昇温速度(100-1000°C/min)にて昇温を開始する(昇温ステージ)。低温から炭素源ガスを流しながら昇温することで、触媒粒子の凝集が進んでいない段階でCNT成長が開始される。CNT成長後はCNT自身によって触媒拡散が抑制されるため、細径なCNTが高密度に成長したCNTアレーを合成した。CNT成長までのCVDプロセスを最適化することで、2層CNTの選択性を高めた。

ラマン分光測定により、合成したCNTフォレストのsp²炭素構造に起因する1590 cm⁻¹付近のGバンドと、sp²炭素の欠陥に起因する1350 cm⁻¹付近のDバンドのピーク強度比(I_G/I_D)を評価した。CNTの層数やチューブ径、チューブ先端構造などの評価は、透過型電子顕微鏡(TEM)により行った。原子間力顕微鏡(AFM)により、基板上的触媒粒子形状および粗さを観察・評価した。

CNTフォレスト基板から直接CNTを引き出し、撚りながら図1に示すようなCNT紡績系を作製した。高強度CNT紡績系を実現するため、真空もしくはアルゴン雰囲気下で1400 Kから3300 KになるようにCNT紡績系にバイアスを印加した(通電加熱処理)。通電加熱処理したCNT紡績系の引張破断応力とヤング率は、ゲージ長25 mmの試料片を用いて引張試験機(引張速度:

1 mm/min) で評価した。

4. 研究成果

図2に、合成時間および合成温度に対する、CNTフォレストの高さと嵩密度を示す。どの合成温度においても、CNTフォレストの成長速度は合成時間経過とともに徐々に減少しており、これは触媒粒子の触媒能が失活していることを意味している。合成時間(t)とCNTフォレスト高さ(H)の関係は(1)の式で表される。

$$H(t) = \beta\tau_0(1 - e^{-t/\tau_0}) \quad (1)$$

ここで、 β はCNTフォレストの初期成長速度 [$\mu\text{m/s}$]、 τ_0 は触媒粒子の寿命 [s]である。各パラメータをフィッティングにより導出し、合成温度が低温になるほど初期成長速度が遅く、触媒寿命は長くなり、一方合成温度を高温にすると初期成長速度が早く、触媒寿命は短くなることが分かった。この結果は、成長温度における初期成長速度と触媒寿命がトレードオフの関係になっていることを示唆している。高温化による触媒活性の向上と、触媒の失活要因となるアモルファスカーボン(a-C)の析出による触媒粒子被覆や、オストワルド熟成による触媒粒子の肥大化、担持層であるアルミナ下層への触媒拡散などが高温になるほど促進されるといった要因が影響していると考えられる。CNTの層数は、2から4層が80%以上を占め、合成温度に大きく依存することは分かった。高温合成では、触媒金属が拡散し凝集することで層数が増える傾向であった。

この研究を実施する中で、Fe触媒にガドリニウム(Gd)を微量に添加するFe-Gdの二元触媒を用いると、触媒拡散を抑制することによって触媒寿命が向上することを新たに発見した。引き続き、二元触媒による乾式紡績可能な長尺・高密度のCNTフォレストの合成を行っている。

紡績系を構成する2層CNT一本の引張強度の評価を行った。評価に用いたCNTの試料は、チューブ外径が約3.3 - 9.2 nm(平均5.4 nm)、チューブ内径が約2.2 - 6.8 nm(平均4.0 nm)を有し、2層と3層のCNTが80%以上の長尺・高密度CNTフォレストから一本引き出し引張試験を行った。引張試験は走査型電子顕微鏡(SEM)内で行い、CNTの一端をTEMグリッドに、もう一方をカンチレバーの探針部分に固定した。引張試験中の動画からCNTの歪みをプロットしていき、引っ張り強度、ヤング率および歪みを算出した。応力-ひずみ曲線から、歪みが少なく高強度(15 GPa以上、ヤング率200 GPa以上)を示す試料と、強度の低い試料に大きく二分されていることが分かった。TEM画像の観察から、CNTの構造がリップル状(うねり)になっているものが多く存在していることから、引っ張り方向に対して伸びる余地を残した状態でCNTが成長していることが分かった。これは、細径かつ少層のCNTの場合、多層CNTに比べて個々のグラフェン面が互いに支えあうことが起こりにくい状態である可能性が考えられる。

CNT紡績系の高強度プロセスとして、CNT紡績系に通電したときのジュール発熱によってサンプルを加熱する通電加熱処理を提案した。CNT紡績系には、合成中に未反応なa-Cの存在がラマン散乱分光測定から分かっている。通電加熱により、残留するa-Cの除去、a-Cから別のカーボン・ナノ構造への構造変化を誘起し、これにより高強度化が実現できると考えている。

真空チャンバにCNT紡績系を設置し、2000 Kの加熱温度で1分間通電加熱を実験的に行った。通電加熱前のCNT紡績系は直径26 μm 、加熱後は直径24 μm と僅かに細径化しており、表面撚り角についても通電加熱前の8°から通電加熱後の5°まで減少していた。高温での加熱処理により、CNT紡績系中に存在する物質の一部が除去され、加熱中の熱振動によって張力がかかり引き伸ばされることで、線径が細く、撚り角が小さくなったと考えられる。図3(a)に、500-2000 cm^{-1} の範囲のラマンスペクトルを示す。Dバンドの強度は通電加熱後に5分の1程度まで減少し、Gバンド強度は5倍程度増加していた。 I_G/I_D は30程度まで向上しており、通電加熱に

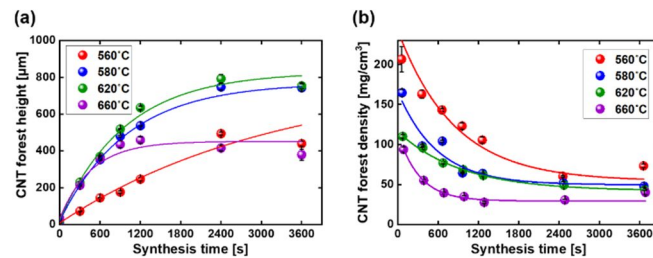


図2. 合成時間および合成温度と (a) CNTフォレスト高さ、(b) 嵩密度との関係

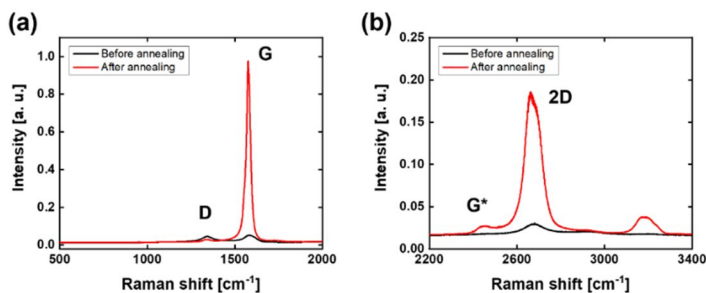


図3. 通電加熱前後のCNT紡績系のラマンスペクトル

より CNT 紡績系の sp^2 構造割合が大幅に向上することを確認した。図 3(b)に、 $2200\text{--}3400\text{ cm}^{-1}$ の範囲のラマンスペクトルを示す。通電加熱後に、 G^* バンド (2400 cm^{-1}) が新たに現れていることが確認された。 G^* バンドはグラフェンやグラファイトの二重共鳴モードに由来するピークである。つまり、通電加熱後の大幅な I_G/I_D の向上は、残留する a-C が部分的にグラフェン構造へと相転移したことにも起因すると考えられる。

通電加熱処理熱時間を 0.1 秒の瞬間的な加熱条件に固定した。印加電圧、つまり加熱温度の上昇に伴ってラマン分光法で測定される結晶性の指標となる GD 比、および破断応力、ヤング率が向上することが確認された。図 4 に、加熱処理を施したサンプルの機械強度のアレー高さ依存性を示す。本研究で、比較的フォレスト高さの低い CNT フォレストから作製した CNT 紡績系

で、最大で破断応力 2.25 GPa、ヤング率 108 GPa を得た。CNT フォレスト高さが高いほど、CNT 紡績系の引張強度が増加する予測に反し、低いフォレストで高強度化が得られる結果となった。

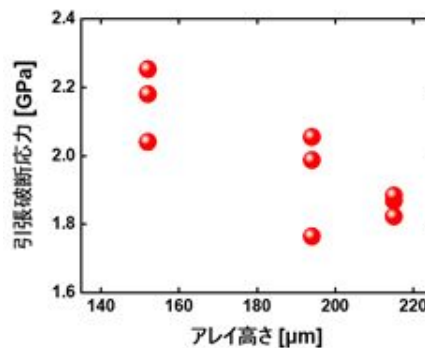


図 4. アレー高さと通電加熱処理した CNT 紡績系の引張強度の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Y. Hayashi, Y. Chiba, H. Inoue, M. Hada, T. Nishikawa	4. 巻 76
2. 論文標題 A review of dry spun carbon nanotube yarns and their potential applications in energy and mechanical devices	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Fiber Science and Technology	6. 最初と最後の頁 72-78
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2115/fiberst.2020-0013	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. Inoue, M. Hada, T. Nakagawa, T. Marui, T. Nishikawa, Y. Yamashita, Y. Inoue, K. Takahashi, Y. Hayashi	4. 巻 158
2. 論文標題 The critical role of the forest morphology for dry drawability of few-walled carbon nanotubes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Carbon	6. 最初と最後の頁 662-671
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.carbon.2019.11.038	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. Misawa, H. Hashimoto, R. K. Kalia, S. Matsumoto, A. Nakano, F. Shimojo, J. Takada, S. Tiwari, K. Tsuruta, P. Vashishta	4. 巻 9
2. 論文標題 Rapid and reversible lithiation of doped biogenous iron oxide nanoparticles	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1828
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-019-38540-8	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 Maik Scholz, Yasuhiko Hayashi, Vyacheslav Khavrus, Daiki Chujo, Hirotaka Inoue, Masaki Hada, Albrecht Leonhardt, Bernd Buchner, Silke Hampel	4. 巻 133
2. 論文標題 Resistance-heating of carbon nanotube yarns in different atmospheres	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Carbon	6. 最初と最後の頁 232-238
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.carbon.2018.03.022	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 Masaki Hada, Yuho Shigeeda, Shin-ya Koshihara, Takeshi Nishikawa, Yoshifumi Yamashita, Yasuhiko Hayashi	4. 巻 122
2. 論文標題 Bond Dissociation Triggering Molecular Disorder in Amorphous H2O	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry A	6. 最初と最後の頁 9579-9584
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpca.8b08455	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 Hirotaka Inoue, Takayuki Yoshiyama, Masaki Hada, Daiki Chujo, Yoshitaka Saito, Takeshi Nishikawa, Yoshifumi Yamashita, Wataru Takarada, Hidetoshi Matsumoto, Yasuhiko Hayashi	4. 巻 8
2. 論文標題 High-performance structure of a coil-shaped soft-actuator consisting of polymer threads and carbon nanotube yarns	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 75316
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5033487	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 -

〔学会発表〕 計18件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 M. Maetani, H. Inoue, T. Nakagawa, K. Nasu, T. Nishikawa, H. Suzuki, Y. Hayashi
2. 発表標題 Synthesis of vertically aligned carbon nanotubes with high density by suppressing migration using Fe/MoxOy catalys
3. 学会等名 第60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 2021年

1. 発表者名 前谷光顕, 井上寛隆, 中川智広, 那須郷平, 鈴木弘朗, 西 亘, 山下善文, 林靖彦
2. 発表標題 Fe-Mo触媒を用いた高結晶カーボンナノチューブの高密度アレイ合成
3. 学会等名 第47回炭素材料学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中川智広, 井上寛隆, 前谷光顕, 鈴木弘朗, 西川亘, 山下善文, 林靖彦
2. 発表標題 二元触媒による乾式紡績可能なCNTアレイ作製条件の検討
3. 学会等名 2020年度 応用物理・物理系学会 中国四国支部合同学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 井上寛隆, 中川智広, 西川亘, 山下善文, 羽田真毅, 高橋和彦, 林靖彦
2. 発表標題 アニール処理における張力がカーボンナノチューブ紡績糸強度に及ぼす影響
3. 学会等名 2020年 第67回 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Nakagawa, H. Inoue, T. Nishikawa, Y. Yamashita, Y. Hayashi
2. 発表標題 Improving of dry-spinnability of carbon nanotube arrays by Fe-Gd catalyst
3. 学会等名 OptoX-NANO 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Inoue, T. Nakagawa, M. Hada, T. Nishikawa, Y. Yamashita, Y. Hayashi
2. 発表標題 Dry-drawable few-walled carbon nanotube forest synthesized by chemical vapor deposition
3. 学会等名 OptoX-NANO 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山田雅人, 井上寛隆, 鈴木弘朗, 西川亘, 山下善文, 林靖彦
2. 発表標題 分子動力学法によるカーボンナノチューブ点欠陥の熱処理修復の解析
3. 学会等名 2020年度 応用物理・物理系学会 中国四国支部合同学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 井上寛隆, 中川智広, 前谷光顕, 那須郷平, 鈴木弘朗, 西川亘, 山下善文, 羽田真毅, 高橋和彦, 林靖彦
2. 発表標題 触媒アシスト加熱延伸処理によるカーボンナノチューブ紡績糸の高強度化
3. 学会等名 2020年 第81回 応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 前谷光顕, 井上寛隆, 中川智広, 那須郷平, 鈴木弘朗, 西川亘, 山下善文, 林靖彦
2. 発表標題 Fe-Mo触媒を用いた高結晶カーボンナノチューブの高密度アレイ合成
3. 学会等名 2020年 第47回 炭素材料学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 13.R. Shikata, Y. Shigeeda, H. Inoue, H. Suzuki, W. Yajima, T. Nakagawa, T. Nishikawa, Y. Yamashita, Y. Hayashi, M. Hada
2. 発表標題 Correlation between the thermal and mechanical properties of the high temperature thermal- treated carbon nanotube yarns
3. 学会等名 第60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 2020年

1. 発表者名 Tomohiro Nakagawa, Hiroataka Inoue, Takeshi Nishikawa, Yoshifumi Yamashita, Yasuhiko Hayashi
2. 発表標題 Improving of dry-spinnability of carbon nanotube arrays by Fe-Gd catalyst
3. 学会等名 OptoX-NANO 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroataka Inoue, Tomohiro Nakagawa, Masaki Hada, Takeshi Nishikawa, Yoshifumi Yamashita, Yasuhiko Hayashi
2. 発表標題 Dry-drawable few-walled carbon nanotube forest synthesized by chemical vapor deposition
3. 学会等名 OptoX-NANO 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井上寛隆, 中川智広, 西川亘, 山下善文, 林靖彦
2. 発表標題 ポストテンショニング処理によるカーボンナノチューブ紡績系の高強度化
3. 学会等名 2019年 第46回 炭素材料学会年会 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Abudullah Al Asad, Keiichi Mitani, Atsushi Ishikawa, Kenji Tsuruta
2. 発表標題 Effect of defect on structural and optical properties in methyl-ammonium lead iodide (MAPbI ₃) perovskite via first principles calculations
3. 学会等名 The 9th International Conference on Multiscale Materials Modeling (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Abudullah Al Asad, Kenji Tsuruta
2. 発表標題 Characterization of 5 Grain Boundary of Methyl-Ammonium Lead Triiodide Perovskite using Density Function Theory
3. 学会等名 第28回日本MRS年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 井上寛隆, 中川智広, 吉山貴之, 羽田真毅, 西川亘, 山下善文, 林靖彦
2. 発表標題 高紡績性CNT合成に向けた合成温度条件とアレイ密度の制御
3. 学会等名 2018年度 応用物理・物理系学会 中国四国支部合同学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 井上寛隆, 中川智広, 羽田真毅, 西川亘, 山下善文, 林靖彦
2. 発表標題 化学気相成長法を用いたCNT合成における合成温度条件がアレイ密度と紡績性に及ぼす影響
3. 学会等名 2018年 第79回 応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroataka Inoue, Takayuki Yoshiyama, Masaki Hada, Daiki Chujo, Yoshitaka Saito, Takeshi Nishikawa, Yoshifumi Yamashita, Wataru Takarada, Hidetoshi Matsumoto, Yasuhiko Hayashi
2. 発表標題 (2)Effects of heat-generation and transport in coil-shaped soft-actuators consisting of polymer threads and carbon nanotube yarns
3. 学会等名 19th International Conferende on The Science and Application of Nanotubes and Low-Dimensional Materials (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔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
研究分担者	鶴田 健二 (Tsuruta Kenji) (00304329)	岡山大学・自然科学研究科・教授 (15301)	
研究分担者	羽田 真毅 (Hada Masaki) (70636365)	筑波大学・数理物質系・准教授 (12102)	
研究分担者	西川 亘 (Nishikawa Takeshi) (80243492)	岡山大学・自然科学研究科・助教 (15301)	
研究分担者	徳永 智春 (Tokunaga Tomoharu) (90467332)	名古屋大学・工学研究科・助教 (13901)	

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
---------	---------