

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：26402

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K05093

研究課題名(和文)カーボンナノチューブメタネットワークの基礎研究

研究課題名(英文)Fundamental research on carbon nanotube metanetworks

研究代表者

古田 寛 (Furuta, Hiroshi)

高知工科大学・システム工学群・教授

研究者番号：10389207

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：カーボンナノチューブ(CNT)で構成する人工神経模擬回路(CNTメタネットワーク)の基礎研究を行った。垂直配向CNTフォレストの横方向(CNT配向と直交方向)電気特性について、横方向に高抵抗を示す短尺(1 μ m)均一高配向CNTフォレスト薄膜で、CNT間コンタクト数増加による導電率上昇が得られた。自己組織化配列ドライエッチング技術により大面積フィッシュネット型メタ材料を作製した。人工神経模擬回路双安定記憶状態では、I-V電気特性ヒステリシスカーブ評価でコンダクタンス値上昇と復元を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

垂直配向カーボンナノチューブ(CNT)フォレストの横方向コンダクタンスと構造相関を明らかにした。大面積加工困難なメタ材料形成プロセスについて、自己組織化現象を利用した大規模加工法を提案し光学特性を実証した。機械学習によるCNTフォレスト断面SEM画像解析法を開発し、特異点や異常値の検出・評価に成功した。人工神経模擬回路で想定するCNT間電気的コンタクトに期待される双安定記憶状態としてI-V特性ヒステリシスカーブ評価でコンダクタンス上昇と復元を確認した。希釈ガスなく熱CVD合成での単層CNT膜合成と、球状触媒基板上CNT合成で、等方性光学特性が期待できる新しいCNT構造体を見出した。

研究成果の概要(英文)：Basic research on artificial neural simulated circuits (CNT meta-networks) composed of carbon nanotubes (CNTs) was conducted. Concerning the transverse (orthogonal to CNT orientation) electrical properties of vertically oriented CNT forests, conductivity increase by increasing the number of contacts between CNTs was obtained in short (1 μ m) uniform highly oriented CNT forest thin films that show high transverse resistance. Large-area fishnet-type metamaterials were fabricated by a self-organized array dry etching technique. In the artificial neuromimetic circuit bistable memory state, conductance increase and restoration were confirmed by I-V characteristic hysteresis curve evaluation.

研究分野：電子物性

キーワード：カーボンナノチューブ 電気特性 光学特性 メタ材料 メタネットワーク ニューロモフィック 機械学習

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。

1. 研究開始当初の背景

近年の深層学習の発展により画像認識で人による画像認識率を超えた計算が可能になった。従来研究では、視神経をモデル化したニューロンの多入力多出力ネットワークを、多段に構成した多層ニューラルネットワークは深層学習とよばれ、特徴量による分類分けなど画像処理分野で成果が大きく、人を超える画像認識能力を計算機が習得したことで大きく注目を集めている。

アルゴリズムによる人工神経模擬回路の実現に刺激を受け、双安定な準位や状態をもつ材料のインパルス応答に注目が集まり、神経模擬回路を電氣的・光学的に実現する手法の開発が始まっている。双安定状態として、電氣的には多入力インパルスの入力記憶による出力制御でニューロン回路を実現し、光学的には、非線形光学効果を用いてヒステリシスを有するメモリ動作が報告されている。理研加藤らは、CNTの表面への吸着を利用した全光メモリの安定動作を確認している(T. Uda et al., ACS Photonics 5, 559 (2018))。また、モット絶縁体の相転移を利用して、VO₂、NbO₂などの酸化物でpsオーダー高速な金属・絶縁体転移も報告されており、光学的双安定状態を実現する研究が行われてきた。

カーボンナノチューブ(CNT)が基板に垂直高配向成長したCNTフォレストには、偏光ラマン散乱波形の入射角依存性、CNT軸方向への低反射高放射率(波長0.2~200μm 反射率~0.01)の新規光物性が報告され、CNTフォレスト構造の光学異方性に強い関心が集まっている。CNTは、電気伝導性、ナノスケールサイズ直径、高いアスペクト比などの特徴から、電磁波波長以下の特徴的なサイズにもたらされる共鳴現象を利用したメタマテリアル材料として興味を持たれている。400nm周期で規則配列した垂直配向孤立CNTにより、1.4μm以下の短波長を透過するハイパスフィルタや、CNTフォレスト構造体をナノロッドアレイとし光波長700nmに対する光解像度150nmの伝搬が報告されている。CNTの一次元性異方性と非線形光学特性は、新機能を発現するメタマテリアルの構成要素として非常に有望である。電磁波波長以下のサイズの電極と電磁波との共鳴によるメタマテリアル吸収は、近年の電子ビーム露光、FIB加工などナノテクノロジーの進展により、可視光領域の屈折率制御に到達したが、ナノサイズの電極の微細加工や3次元加工を大規模形成することはいまだ困難な課題である。

2. 研究の目的

1次元異方性構造を有するCNTを、電磁波波長よりも小さな人工構造物とし成長制御によって配線構造を形成し、CNT成長制御による配線の自己形成により、従来のメタマテリアル研究での3次元微細加工の困難さの課題を解決する。ナノチューブフォレストの非線形光学特性を利用してMNIST手書き文字パターンを識別することを本研究の目的とする。メタ原子となるCNT配線構造物を設計し電磁場吸収評価により、吸収特性とメタ原子構成材料のCNT一次元性構造との相関を明らかにする。

CNTフォレストメタマテリアルの非線形光学特性を利用し、MNIST手書き文字パターンを識別する研究において、各要素技術開発では、表面の非常に大きいCNTフォレストが作る電氣的ネットワークが有する非線形光学特性と、メタマテリアル配線を組み合わせ設計した分散特性を利用した学習・読み取りにより、CNTフォレストメタマテリアルによる双安定状態を実現し、CNTフォレストメタマテリアルと視神経系構造との類似性について、人工材料で実現できることを明らかにする。

3. 研究の方法

非線形光学特性を持つ単層カーボンナノチューブを、波長程度厚さ1μmのカーボンナノチューブフォレストフィルムを作製する。原子間力顕微鏡観察により触媒微粒子の凝集機構と、SEM測定によりカーボンナノチューブフォレストの粗密を画像解析から明らかにする。光学特性と画像の対応関係を機械学習により明らかにし、特定波長に吸収を持つCNTフォレスト構造を特定する。

(a1) CNT成長方位制御とCNT異方性構造体の作製

高効率波長選択吸収には、高い配向性のCNTフォレストが有効と考え、輻射電磁波の方位制御にはCNTの異方性構造が有効と考えている。赤外領域電磁場の共鳴吸収の効果を調べるため、CNT配向性を任意に制御する必要があり、CNT異方性3次元成長をシーズ技術としたCNT構造体を作製する。電磁場応答構造体には、CNT電極構造をメタマテリアル配線サイズで成長制御し、電磁場吸収特性測定により評価する研究を行う。CNTフォレストメタマテリアル形状と、光吸収特性の相関から、機械学習により特定波長に吸収を持つCNTフォレストメタマテリアル形状を明らかにする。

(a2) CNTフォレスト構造体の電磁場吸収評価

配向構造制御したCNTフォレストフィルムについて、電磁場(赤外、テラヘルツ、可視光領域)吸収の構造依存性(長さ、密度、層数、配向性、結晶性)を測定評価する。赤外エリプソメトリ反射および透過スペクトルを測定し、CNTフォレストナノロッドの配向性と誘電率異方性、放射分布の相関を明らかにする。CNTフォレスト構造体の物理的構造、電氣的物性と、電磁場吸収特

性の相関を明らかにする。

(b) メタマテリアルパターン配線設計試作

CNT フォレストとメタル電極パターンを組み合わせた波長分散メタマテリアルを設計加工し、FDTD 計算によりスペクトル予測を行う。設計の電磁波伝搬特性予測には保有する Poynting を用いる。CNT フォレストパターンの役割として、配線パターン化による波長選択的吸収と、CNT 配向制御により、メタル電極配線への効率的な信号伝達可能なプロセス設計を行う。基板上触媒微粒子形成についてアニールにより島状形成制御を行う。1 μm 以下長さに成長した CNT、炭素系材料の非線形光学効果を、赤外エリプソメトリと電気測定により評価する。

CNT フォレストメタマテリアル吸収特性を利用した神経模擬回路を作製する。人工神経模擬回路実証としては、学習フェーズについて、MNIST 画像パターンフィルムを通しインパルス白色光源を CNT メタマテリアルパターンに照射し、出射光を CCD カメラにより測定評価する。演算フェーズについて、インパルス白色光源を照射中の CNT メタマテリアルパターンに対し、レーザー光源を照射しその反射光に含まれる、記憶した識別信号を CCD カメラに結像し、手書き文字の識別を行う。

4. 研究成果

熱 CVD 法で基板成長により合成した垂直配向 CNT フォレストについて、横方向 (CNT 配向と直交方向) へのコンダクタンスを I-V 測定で評価した。膜厚 5 ~ 2.5 μm の範囲で調整した CNT フォレストでは、膜厚が薄いほど横方向導電率が単調増加したが、膜厚を 1 μm に薄くすることで導電率は減少した。断面 SEM 画像解析により、5 ~ 2.5 μm 膜厚の CNT フォレストで上部ランダム配向比率が高い層の横方向コンダクタンス G が高いため、膜厚が低下し上部ランダム配向層の相対体積比率が増加したことで導電率が下がったと結論した (図 1, [1])。1 μm 膜厚の CNT フォレストは断面 SEM 画像解析で CNT フォレストが不均一成長し横方向に島状不連続膜を形成し導電率が低下したことを明らかにした。熱 CVD での触媒微粒子凝集条件を調整し、ガス導入前アニール時間依存性を調べ、触媒微粒子の高面密度分散の条件のアニール条件が 3 ~ 3.5 分であることを特定し、目標とする短尺 (1 μm) 均一な高配向 CNT フォレスト薄膜の作製に成功した。膜厚 1 μm に調整した均一膜厚の CNT フォレスト薄膜では CNT 密度が高いほど横方向導電率が上昇し、CNT 同士の電気的コンタクト数が増えたために横方向導電率が上昇したと結論した。人工神経模倣回路の現時点での目標モデルとして、CNT 同士のコンタクトを双安定記憶状態として用いるため、I-V 特性のヒステリシスカーブを評価した。アップワーズとダウンワーズ方向の I-V 特性にヒステリシスが生じたがその強度は装置測定限界程度であった。垂直配向 CNT フォレスト内の CNT 間電気的コンタクトを明らかにするため、CNT フォレストの横方向導電率を測定した。垂直配向 CNT フォレストの成長形態 (高さ・密度・配向性) 制御による横方向導電率の変化を評価した。単位体積あたりの電気的コンタクト数を増加させる目的とした CNT 合成条件の探索では、触媒アニール時間 2 分 45 秒において、面内高さばらつきが最小化する 210 nm 均一高さの垂直配向 CNT フォレストを合成した。前年度、1 μm 以下高さの CNT フォレスト垂直配向性制御に課題があり、高さ 1 μm 以下の CNT フォレストでは、密度低下に伴って、横方向導電率を上昇させる横方向配向の CNT 比率が上昇し、CNT 間電気的コンタクトを伴わない導電率の上昇の課題があった。短尺・高密度・垂直配向 CNT フォレストフィルムの合成によりこれを解決し、従来の横方向導電率を 15k/ cm から 0.15/ cm まで低下させることに成功した。

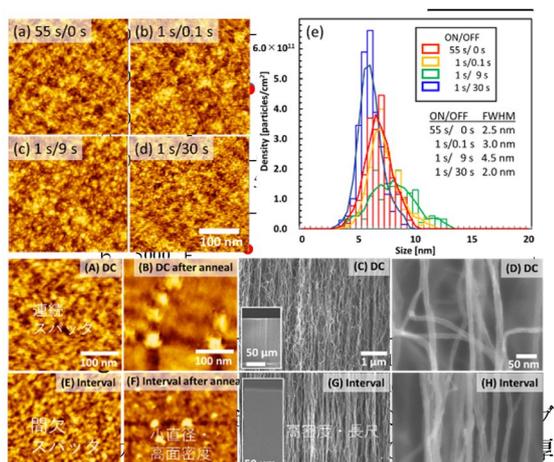


図 3 (a-e) 熱酸化 Si 基板上堆積した間欠スパッタ Fe 薄膜 AFM 画像 ON/OFF 時間比依存性 (A-H) AlO(30nm)/Si 基板上連続/間欠スパッタ Fe 薄膜、(A, E)アニール前、(B, F)アニール後 AFM 画像および(C, D, G, H)CNT 合成後断面 SEM 画像 [2]

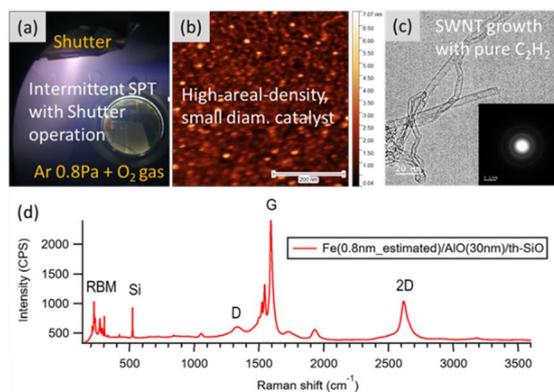


図 1 (a)シャッター開閉機構を有する間欠スパッタ堆積 (b)間欠スパッタで得られた高面密度触媒微粒子 AFM 画像(c)希釈ガスを用いることなく合成した単層 CNT の TEM 写真(d)ラマンスペクトル[3]

目標としていた単層カーボンナノチューブ合成の研究では、間欠スパッタを用いた小直径・高密度の触媒微粒子形成の研究に取り組み、間欠スパッタ堆積により CNT 合成温度 730 °C での凝集を抑制した触媒形成について論文で報告した(図 2 [2])。さらに、スパッタリング装置への自動制御シャッター閉鎖機構を作製し、間欠スパッタにより堆積した触媒を用いることで、純アセチレンを原料とした熱 CVD 合成により、一般的に用いられる水素やアルゴンによる希釈なしに単層カーボンナノチューブを合成し学会報告した(図 3[3])。

光学応答を利用した人工神経模倣回路の開発では、CNT フォレストの光学回路メタ材料を研究した。ポリスチレンビーズの自己組織化配列とドライエッチング技術で作製した大面積のフィッシュネット型メタ材料を解析し論文報告した(図 4 [4])。

成長制御による配線構造形成により、大規模なメタ材料電極の大量作製が可能となり、メタ材料の人工神経模倣回路材料への利用が期待できる。

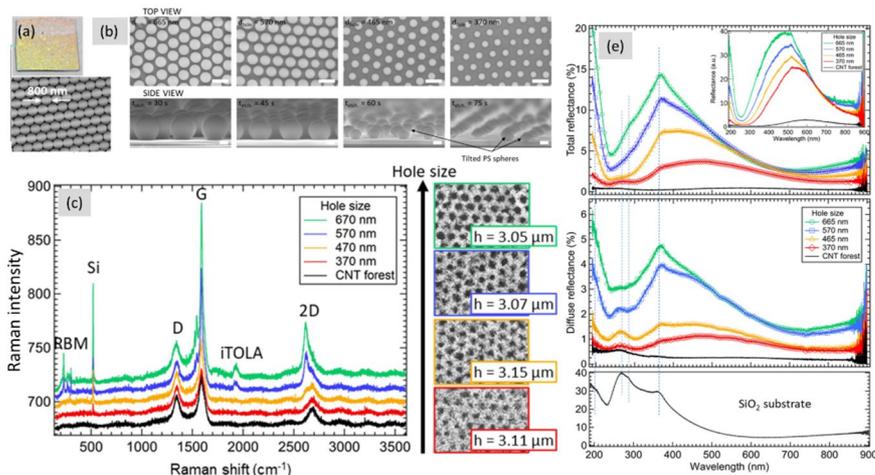


図 4 (a)ポリスチレン (PS) ビーズマスク外観と(b)SEM 電子顕微鏡画像、PS ビーズマスク加工によりフィッシュネット型メタ材料電極形状に合成した CNT フォレストメタ材料の(c) 単層カーボンナノチューブを示すラマンスペクトル (d) 光学スペクトル[4]

CNT フォレスト断面 SEM 画像を解析し、オートエンコーダによる特徴量抽出でバンドル化 CNT の自動抽出に成功し学会報告した。人工神経模倣回路の目標モデルで想定する CNT 間電氣的コンタクトに期待される双安定記憶状態は、I-V 特性ヒステリシスカーブ評価では間欠測定でコンダクタンス値上昇と復元を確認した。熱 CVD 精密プロセス制御では熱 CVD 合成排気真空環境を質量分析を用いて制御し、触媒微粒子の AFM 評価から微量残存酸素による触媒凝集抑制効果を学会報告した。球状触媒基板上 CNT 合成を論文報告し、等方的光学特性が期待できるメタ材料応用への可能性について言及した[5]。

参照

- [1] 沢田侑斗, 野村慧梧, 西森秀人, 古田寛, 垂直配向カーボンナノチューブフォレストの横方向導電率評価, 16p-Z30-2, 2021 年第 68 回応用物理学学会春期学術講演会 (2021.03.16-19, オンライン開催) DOI: 10.11470/jsapmeeting.2021.1.0_2789
- [2] H. Koji, Y. Kusumoto, A. Hatta, and H. Furuta, "Formation of Thermally Stable, High-Areal-Density, and Small-Diameter Catalyst Nanoparticles via Intermittent Sputtering Deposition for the High-Density Growth of Carbon Nanotubes", *Nanomaterials* 12 (2022) 365. DOI: 10.3390/nano12030365
- [3] T. Marui, Y. Sawada, H. Furuta, "High area density and small diameter catalyst nanoparticle formation by magnetron sputtering deposition utilizing automated shutter", 1P-3, The 62nd Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium (FNTG62), (Mar. 2-4, 2022, Nagoya Univ. online)
- [4] A. Pander, T. Onishi, A. Hatta, and H. Furuta, "Fabrication of Self-Assembling Carbon Nanotube Forest Fishnet Metamaterials", *Nanomaterials* 12(3) (2022) 464. DOI: 10.3390/nano12030464
- [5] K. Kobiro, H. Kimura, S. Hirose, M. Kinjo, and H. Furuta, "Solvochemical synthesis of hair-like carbon nanotubes onto sub-micron-sized spherical metal oxide catalyst cores", *RSC Advances* 13 (2023) 13809-13818. DOI: 10.1039/d3ra00770g

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Pander Adam, Onishi Takatsugu, Hatta Akimitsu, Furuta Hiroshi	4. 巻 12
2. 論文標題 Fabrication of Self-Assembling Carbon Nanotube Forest Fishnet Metamaterials	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nanomaterials	6. 最初と最後の頁 464 ~ 464
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/nano12030464	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 Koji Hirofumi, Kusumoto Yuji, Hatta Akimitsu, Furuta Hiroshi	4. 巻 12
2. 論文標題 Formation of Thermally Stable, High-Areal-Density, and Small-Diameter Catalyst Nanoparticles via Intermittent Sputtering Deposition for the High-Density Growth of Carbon Nanotubes	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nanomaterials	6. 最初と最後の頁 365 ~ 365
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/nano12030365	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 古田 寛, 圓井 太智, 小路 紘史, Adam Pander	4. 巻 98
2. 論文標題 プラズマを使った触媒生成による高密度カーボンナノチューブ (カーボンナノチューブフォレスト) 生成とそのデバイス応用	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 プラズマ・核融合学会誌	6. 最初と最後の頁 153 ~ 157
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 Kobiro Kazuya, Kimura Hinako, Hirose Saki, Kinjo Makoto, Furuta Hiroshi	4. 巻 13
2. 論文標題 Solvothermal synthesis of hair-like carbon nanotubes onto sub-micron-sized spherical metal oxide catalyst cores	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 RSC Advances	6. 最初と最後の頁 13809 ~ 13818
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d3ra00770g	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21件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Hiroshi Furuta
2. 発表標題 Nano-carbon Metamaterials
3. 学会等名 12th Asian-Australasian Conference on Composite Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 R. Shinsei, H. Furuta
2. 発表標題 Feature extraction and clustering using autoencoder from CNT forest cross-sectional SEM image
3. 学会等名 FNTG64 (The 64th Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroshi Furuta, Taichi Marui, Yuto Sawada, Rebekah Arias, Nobuyoshi Kameoka, Ryuichi Shinsei, Nezhil Pala
2. 発表標題 Single-walled carbon nanotube growth on Fe catalyst nanoparticles formed by intermittent shutter sputtering
3. 学会等名 FNTG63 (The 63th Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 沢田 侑斗, 亀岡 伸義, 神生 龍一, 古田 寛
2. 発表標題 CNT成長構造に及ぼす触媒堆積時及びCVD炉内残存大気の効果
3. 学会等名 第70回 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 H. Furuta, T. Marui
2. 発表標題 SWNT growth on Fe catalyst deposited utilizing automated shutter
3. 学会等名 OPTO2022 (光・量子ビーム科学合同シンポジウム2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 古田 寛
2. 発表標題 CNTのメタマテリアル応用と成長制御
3. 学会等名 テラヘルツ・光科学の最新トレンド2022 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Jose Rivero, Rebekah Arias, Yuto Sawada, Tomu Yamato, Nezh Pala and Hiroshi Furuta
2. 発表標題 3DプリンタマスクプロセスによるCNTメタマテリアル加工
3. 学会等名 2022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 2022年

1. 発表者名 山本 十夢, 沢田 侑斗, 亀岡 伸義, ホセ・リベロ, 古田 寛
2. 発表標題 3Dプリンタによるマスクを使用したCNTメタマテリアル作製
3. 学会等名 2022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 2022年

1. 発表者名 神生 龍一, 沢田 侑斗, 西森 秀人, Rebekah Arias, 古田 寛
2. 発表標題 機械学習を用いたCNTフォレスト断面SEM画像からの特徴抽出
3. 学会等名 2022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 2022年

1. 発表者名 沢田 侑斗, 西森 秀人, 亀岡 伸義, 古田 寛
2. 発表標題 CVD炉内環境分析によるCNT合成精度向上
3. 学会等名 2022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 2022年

1. 発表者名 西森 秀人, 沢田 侑斗, 亀岡 伸義, 八田 章光, 古田 寛
2. 発表標題 CNTフォレスト断面SEM画像の画像処理と結像条件の測定
3. 学会等名 2022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 2022年

1. 発表者名 亀岡 伸義, 沢田 侑斗, 西森 秀人, Joaquin Rivero, 古田 寛
2. 発表標題 初期成長CNT forest filmの横方向電気伝導特性
3. 学会等名 2022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 2022年

1. 発表者名 Rebekah Arias, Yuto Sawada, Nobuyoshi Kameoka, Md Saiful Islam, Jose Joaquin Rivero III, Nezhil Pala, Hiroshi Furuta
2. 発表標題 シャッタースパッタリング触媒上の単層カーボンナノチューブ成長における画像解析
3. 学会等名 2022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 2022年

1. 発表者名 H. Furuta, Shimon Honda, Saiful Islam, Akimitsu Hatta
2. 発表標題 Thermal properties of MWNT coatings for solar collector
3. 学会等名 The 61st Fullerene-Nanotube-Graphene General Symposium (FNTG-61) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Marui, Y. Sawada, H. Furuta
2. 発表標題 High area density and small diameter catalyst nanoparticle formation by magnetron sputtering deposition utilizing automated shutter
3. 学会等名 The 62st Fullerene-Nanotube-Graphene General Symposium (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 古田寛
2. 発表標題 カーボンナノチューブのメタマテリアル応用とSDGsへの期待
3. 学会等名 熱に関するメタマテリアルの原理, 設計の効率化, 応用, 評価, 技術情報協会セミナー (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Furuta
2. 発表標題 Carbon Nanotube Metamaterials for the Future Energy Devices
3. 学会等名 Virtual Conference on Future of Science 2020 (SciCon2020), (25 Sept. 2020, Web conference https://iaas.tiikm.com/scicon-2020/). (KEYNOTE SPEECH) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 沢田侑斗, 西森秀人, 野村慧梧, 大石雅樹, 八田章光, 古田寛
2. 発表標題 垂直配向カーボンナノチューブの横方向導電性評価
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, (2020.08.02, オンライン開催 https://annex.jsap.or.jp/chushi/jsapcs2020/index.html)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 沢田侑斗, 野村慧梧, 西森秀人, 古田寛
2. 発表標題 垂直配向カーボンナノチューブフォレストの横方向導電率評価
3. 学会等名 2021年応用物理学会春期学術講演会(2021.03.16-19, オンライン開催 https://meeting.jsap.or.jp/)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西森秀人, 沢田侑斗, 野村慧梧, 大石雅樹, 八田章光, 古田寛
2. 発表標題 カーボンナノチューブフォレスト構造の画像解析と電気的特性の相関
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, (2020.08.02, オンライン開催 https://annex.jsap.or.jp/chushi/jsapcs2020/index.html)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西森秀人, 沢田侑斗, 野村慧梧, 八田章光, 古田寛
2. 発表標題 カーボンナノチューブフォレストのFFT画像処理と配向性評価
3. 学会等名 2021年応用物理学会春期学術講演会(2021.03.16-19, オンライン開催 https://meeting.jsap.or.jp/)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 分担執筆 54名(8章分担 古田寛)	4. 発行年 2022年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 508
3. 書名 メタマテリアルの設計、作製と新材料、デバイス開発への応用	

〔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	岩田 誠 (Iwata Makoto) (60232683)	高知工科大学・情報学群・教授 (26402)	
研究分担者	中嶋 誠 (Nakajima Makoto) (40361662)	大阪大学・レーザー科学研究所・准教授 (14401)	
研究分担者	小林 弘和 (Kobayashi Hirokazu) (60622446)	高知工科大学・システム工学群・准教授 (26402)	

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			
米国	Florida International University			