

令和 4 年 9 月 15 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2020

課題番号：16H02083

研究課題名(和文) エコロジーエネルギー、環境社会構築のためのナノカーボン素材の先端材料デザイン

研究課題名(英文) Design of carbon nanotube-based advanced materials for environmental friendly energy-oriented society

研究代表者

中嶋 直敏 (Nakashima, Naotoshi)

九州大学・カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所・特任教授

研究者番号：80136530

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,000,000円

研究成果の概要(和文)：エコロジーエネルギー、環境社会構築のためのナノカーボン素材の先端材料デザインに関する研究を行い、以下の成果を得た。(i)高性能酸素還元能を持つフタロシアニン鉄(II)錯体担持カーボンナノチューブ(CNT)を開発した。(ii)安価なニッケル、鉄、硫黄を原料とする新規高性能2官能性電極触媒を開発し、この触媒を用いて高性能Zn-空気電池を開発した。(iii)ニッケル配位ポリマー/ナノカーボン分子触媒を開発した。(iv)長鎖基を持つ多種のフラビン誘導体を合成し、これらの単層CNT(SWNT)表面での自己集合を利用して、高選択的な半導体性SWNTの選択的分離を達成し、分離メカニズムを解明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

カーボンナノチューブ(CNT)は、溶媒に不溶であるが、本申請者は、世界先駆けて「可溶化CNT」のコンセプトを提案、推進してきた。本研究では、この新素材「溶解CNT」を用い、社会が求める画期的な電池材料開発、ならびに簡便かつ超高効率での半導体性CNT分離研究を展開した。具体的には、CNTを素材として、高性能の酸素還元能、並びに酸素還元、酸素発生能の2官能性電極触媒能を持つ電極触媒の開発に成功し、これらを用いて高性能空気 亜鉛電池を開発した。本研究は、電池や分子触媒における先端エネルギー材料の開発にとって重要な成果であるとともに、簡便なSWNTの選択的分離に対する大きな進展である。

研究成果の概要(英文)：A research on advanced material design of nanocarbon materials for ecology energy and useful for environmental society was carried out, and the obtained important results are summarized as follows. (1) We developed a phthalocyanine iron (II) complex/ carbon nanotube (CNT) composite with high oxygen reduction ability. (2) A new high-performance bifunctional electrode catalyst made from nickel, iron, and sulfur was developed, and applied the material for fabrication of a high-performance Zn-air battery. (3) A nickel coordinated polymer / nanocarbon-based molecular catalyst was developed. (4) Various flavin derivatives having long-chain groups were designed and synthesized, and their self-assembly on the surface of the single-walled CNTs (SWNTs) was used to achieve highly selective separation of semiconducting SWNTs. The separation mechanism was elucidated by computational chemistry. These achievements are of importance for simple selective separation of semiconducting SWNTs.

研究分野：ナノカーボン化学、先端材料科学

キーワード：カーボンナノチューブ 超分子化学 可溶化ナノチューブ フラビン 非白金触媒 酸素還元反応 酸素発生反応 空気-亜鉛電池

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

カーボンナノチューブ (CNT) は、溶媒に不溶であるが、本申請者は、世界先駆けて「可溶化 CNT」のコンセプトを提案、推進してきた。この新素材「溶解 CNT」を用いることで CNT の極限的な物性(強度、電気伝導度など)を最大限に引き出した材料がデザイン・構築・展開できる。しかしながら、これまでにこの分野では、多彩な研究が行われてきたにもかかわらず、CNT をベースにした社会が求める画期的な電池材料や、簡便かつ超高効率での半導体性 CNT 分離研究は、まだ不十分であった。

2. 研究の目的

本研究では、これらの背景をもとに、次の2つの課題に焦点を当て、21 世紀の科学技術を支え、社会が求める画期的なナノ材料を創成することを目的とした。

課題1：次世代のエコエネルギー社会が求めるイモータル (不死身) 燃料電池触媒の創成

課題2：簡便かつ超高効率での半導体性 CNT と金属性 CNT の分離法の開発 (これらは、次世代エレクトロニクス、エネルギー、環境分野における革新的エコ素材となる)

3. 研究の方法

課題1に対して：CNT をベースとした高性能の Pt 系触媒、並びに非 Pt 系触媒の開発を目指した。また本研究でデザイン、合成した触媒は、金属溶解が極めて小さく、高い耐久性が期待できるため、長時間運転による耐久性試験を実施した。一方、アルカリ型高分子固体電解質形燃料電池の最大の問題点は、高い十分なアニオン導電性を示す材料が未だに見出されていないことである。本研究では、4級アンモニウム塩基修飾ポリマーを合成し、アニオン型電解膜として、その性能を評価した。一方、非 Pt 系触媒として、フタロシアニン鉄(II)錯体担持 CNT (合成条件を最適化) の作製、並びにこれを用いた燃料電池特性を評価するとともに、この高性能発現の分子レベルメカニズムを解明した。さらに、安価な Fe, Ni, S を用い、CNT をベースとした新しい電池触媒及び分子触媒をデザイン、合成した。

課題2に対して：長鎖基を持つフラビン誘導体を設計、合成し、これらの単層 CNT (SWNT) 表面での自己集合を利用して、高選択的な半導体性 SWNT の選択的分離、ならびに分離メカニズム解明に焦点を当てた。具体的には、計算化学手法や、速度論法、平衡論法を駆使して、半導体性 SWNT の分離のメカニズムの解明を行った。また、ビタミン B2 誘導体による長い高純度半導体性(金属性)SWNT の高効率分離の最適化研究を行った。安価に市販しているリボフラビン (ビタミン B2) は水溶性であり、水中で SWNT を可溶化はするが、半導体性/金属性 SWNT の選択分離は出来ない (研究代表者の未発表成果)。本研究では、ビタミン B2 の水酸基を化学修飾して、トルエンに可溶なビタミン B2 誘導体を合成し、半導体性/金属性 SWNT の選択分離を行った。

4. 研究成果

課題1では、多層カーボンナノチューブを素材とする超高耐久性の燃料電池触媒の作製に成功し、そのメカニズムを明らかにした。また、安価な非白金型燃料電池触媒の開発研究でも、成果を挙げ、成果は、著名な国際学術雑誌に掲載した。具体的な成果は以下のようである。(1) ポリベンズイミダゾールの化学修飾(グラフト化)による新しい電解質膜を合成し、その特性を調べた。得られた電解質膜の伝導度は、ナフィオン膜には及ばないが、100°C以上の高温では、燃料電池の電解質膜として使用できることがわかった。(2) 非白金型燃料電池触媒の開発に関して、フタロシアニン鉄(II)錯体担持 CNT (合成条件を最適化) が、Pt/C に匹敵あるは上回る 4 電子酸素還元能を示すことを見出した。さらに種々のナノカーボンを用いてフタロシアニン鉄(II)錯体担持触媒を作製し、ハーフセルでそれらの酸素還元能を測定し、合成の触媒間の性能の比較を行ったところ、ナノカーボンの比表面積が、酸素還元能と関係していることがわかった。Tafel プロット解析、ターンオーバーフリークエンシー

解析より、高性能酸素還元能のメカニズムを明らかにした。(3) 高価な白金を用いずに、安価なニッケル、鉄、硫黄を原料とする新規電極触媒を設計、合成した。具体的には、ポリマー被覆多層カーボンナノチューブ(MWNT)上に Ni/Fe-層状複水酸化物を担持し、これに水熱合成法で硫黄をドープした新しい触媒を合成した。触媒のナノ構造は電子顕微鏡、熱重量分析、X線回折、X線光電子分光、X線吸収端微細構造によって解析した。この触媒は、リニアースweepボルタモグラム測定により、酸素還元反応の半端電位が 0.80 V vs. RHE、また、10 mA/cm²での酸素発生電位が 1.49 V vs. RHE と高い 2 官能性触媒としての機能を示すことがわかった。(4) Fe, Ni, 及び S を原料とした Fe₃NiS₈ 合成し、これをナノカーボン(多層 MWNT など)と複合させた新しい触媒をデザイン、合成した。これらの触媒が非常に高い OER (10 mA/cm² で 1.55V) および ORR (E_{1/2} = 0.82 V vs RHE) 活性を示すことを見出した。構造解析ソフトウェア、その場電気化学 FT-IR、透過型電子顕微鏡 (TEM)、およびコンピューターシミュレーションとともに、その場電気化学 X線回折(XRD)による分析に基づいて、触媒のナノ構造を解明した。さらに、触媒を用いて、充放電可能な Zn-空気および水電解セルを作製した。Zn-空気電池は 0.66V という低い充放電過電圧ギャップを示した。また 1.9V での電流密度は、237 mA cm⁻²であった。第一原理計算を使用して、反応メカニズムを精査し、触媒活性に対する CNT の効率的な役割を解明した。(5) ニッケル (Ni) 配位ポリ (チオ尿素-ホルムアルデヒド) ポリマーを分子設計、合成し、これとナノカーボン (バルカン、多孔質ナノカーボン、2つの異なる多層カーボンナノチューブ、または単層カーボンナノチューブ) を導電性担体とした、7つの異なる分子触媒を調製した。Ni 配位ポリマーの化学構造は、元素分析、C13 NMR、FT-IR および光電子分光法によって同定した。さらに、X線吸収微細構造解析 (EXAFS)、ならびに、密度汎関数 (DFT) 計算により、このポリマーは 2つの Ni-O (2.17Å) と 2つの Ni-S (2.17Å) 配位結合で構成されていることを明らかにした。この触媒は、酸素還元反応 (ORR) および酸素発生反応 (OER) の効率的な触媒として機能することがわかった。さらに、この触媒は、再充電可能な Zn-空気電池の効率的で耐久性のあるカソードとして機能した。ここで、充放電過電圧ギャップは 0.45 V と非常に小さく、これは Zn-空気電池が高性能であることを意味する。このような卓越した性能は、ポリマー中の Ni の軸方向サイト上の水と多孔質炭素上のスーパーオキシドイオンとの間の協調メカニズムによって説明できた。本研究は、電池や分子触媒における先端エネルギー材料の開発にとって重要な成果である。

課題 2 では、長鎖基を持つ多種のフラビン誘導体を設計、合成し、これらの SWNT 表面での超分子化学的な自己集合を利用して、高選択的な半導体性単層カーボンナノチューブ (SWNT) の選択的分離を達成した。ここでは、これらフラビン類縁体を用いた半導体性 SWNT と金属性 SWNT 分離の詳細な解明を行い、効率的な半導体性 SWNT と金属性 SWNT 分離に対するフラビンの化学構造の重要性を見出した。具体的成果は以下の通りである。(1) 効率的な半導体性 SWNT と金属性 SWNT 分離には、フラビン誘導体に水素結合部位、長鎖基、7,8 位の置換基の 3つが重要な役割を果たしていることを示した。また、分離後、溶媒によるリンスにより簡単に分離材のフラビンを除去できることを X線光電子分析により示し、これによりフラビン分離材の再利用への道を拓いた。さらに、計算化学手法や、速度法、平衡論法を駆使して、フラビン類縁体を用いた半導体性 SWNT と金属性 SWNT 分離のメカニズムの解明を進め、効率的な半導体性 SWNT と金属性 SWNT 分離に対するフラビンの化学構造の重要性を指摘した。(2) フラビン誘導体の 7,8 位に金属イオン配位基を導入した分子を用いると(8,6),(9,4)の半導体性 SWNT が選択分離できることを見出した。計算化学的手法により、このメカニズムを解明した。(3) 長鎖基を導入したリボフラビン (ビタミン B2) 誘導体が、トルエン中で、効率的な半導体性 SWNT/金属性 SWNT 分離能を持つことを見出した。さらにこの分離材が、右巻き SWNT/左巻き SWNT の認識能があることを見出した。これに対しても計算化学的手法により、このメカニズムを解明した。さらに、分離後、溶媒によるリンスにより簡単にこの分離材を除去できることを示した。これらの成果は、簡便な

SWNT の選択的分離に対する大きな進展である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計21件（うち査読付論文 16件 / うち国際共著 8件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Cheng J., Ganesan P., Wang Z., Zhang M., Zhang G., Maeda N., Matsuda J., Yamauchi M., Chi B., Nakashima N.	4. 巻 3
2. 論文標題 Bifunctional electrochemical properties of La _{0.8} Sr _{0.2} Co _{0.8} Mn _{0.2} O _{3-δ} (M = Ni, Fe, Mn, and Cu): efficient elemental doping based on a structural and pH-dependent study	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Materials Advances	6. 最初と最後の頁 272 ~ 281
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D1MA00632K	査読の有無 無
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 Ganesan Pandian, Staykov Aleksandar, Shu Hiroaki, Uejima Mitsugu, Nakashima Naotoshi	4. 巻 3
2. 論文標題 Designing an Fe(III)-Doped Nickel Sulfide/Carbon Nanotube Hybrid Catalyst for Alkaline Electrolyte Membrane Water Electrolyzers and Zn-Air Battery Performances	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Applied Energy Materials	6. 最初と最後の頁 10961 ~ 10975
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsaem.0c01931	査読の有無 無
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 Cheng Junfang, Higashi Manabu, Maeda Nobutaka, Matsuda Junko, Yamauchi Miho, Nakashima Naotoshi	4. 巻 361
2. 論文標題 CO ₂ -free energy circulation system-Polymer electrolyte alcohol electro-synthesis cell with a low iridium content anode based on in situ growth method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Electrochimica Acta	6. 最初と最後の頁 137078 ~ 137078
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.electacta.2020.137078	査読の有無 無
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 Staykov Aleksandar, Toshimitsu Fumiyuki, Hashimoto Wataru, Nakashima Naotoshi	4. 巻 56
2. 論文標題 A Flavin-Cu(II) Supramolecular Complex for Highly Selective Sorting of Semiconducting Single-walled Carbon Nanotubes with Specific Chiralities	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemical Communications	6. 最初と最後の頁 12415 ~ 12418
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D0CC04573J	査読の有無 無
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 Shiraki Tomohiro, Miyachi Yuhei, Matsuda Kazunari, Nakashima Naotoshi	4. 巻 53
2. 論文標題 Carbon Nanotube Photoluminescence Modulation by Local Chemical and Supramolecular Chemical Functionalization	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Accounts of Chemical Research	6. 最初と最後の頁 1846 ~ 1859
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.accounts.0c00294	査読の有無 無
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 Yang Jun, Ganesan Pandian, Ishihara Akimitsu, Nakashima Naotoshi	4. 巻 11
2. 論文標題 Carbon Nanotube Based Non Precious Metal Electrode Catalysts for Fuel Cells, Water Splitting and Zinc Air Batteries	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ChemCatChem	6. 最初と最後の頁 5929 ~ 5944
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/cctc.201901785	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 Berber Mohamed R., Nakashima Naotoshi	4. 巻 11
2. 論文標題 Tailoring Different Molecular Weight Phenylene-Polybenzimidazole Membranes with Remarkable Oxidative Stability and Conductive Properties for High-Temperature Polymer Electrolyte Fuel Cells	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces	6. 最初と最後の頁 46269 ~ 46277
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsami.9b18314	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 Yang Jun, Cheng Junfang, Tao Jie, Higashi Manabu, Yamauchi Miho, Nakashima Naotoshi	4. 巻 2
2. 論文標題 Wrapping Multiwalled Carbon Nanotubes with Anatase Titanium Oxide for the Electrosynthesis of Glycolic Acid	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Applied Nano Materials	6. 最初と最後の頁 6360 ~ 6367
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnm.9b01357	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 Cheng Junfang, Yang Jun, Kitano Sho, Juhasz Gergely, Higashi Manabu, Sadakiyo Masaaki, Kato Kenichi, Yoshioka Satoru, Sugiyama Takeharu, Yamauchi Miho, Nakashima Naotoshi	4. 巻 9
2. 論文標題 Impact of Ir-Valence Control and Surface Nanostructure on Oxygen Evolution Reaction over a Highly Efficient Ir-TiO ₂ Nanorod Catalyst	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Catalysis	6. 最初と最後の頁 6974 ~ 6986
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acscatal.9b01438	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 Toshimitsu Fumiyuki, Ishimaru Wataru, Nakashima Naotoshi	4. 巻 92
2. 論文標題 Individual Solubilization Behavior of Single-Walled Carbon Nanotubes by Riboflavin (Vitamin B ₂) in Water and Its Analyses Using Regression Approach and Computational Simulations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Bulletin of the Chemical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1679 ~ 1683
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/bcsj.20190141	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 K. Ozono, M. Fukuzawa, F. Toshimitsu, T. Shiraki, T. Fujigaya, N. Nakashima	4. 巻 91
2. 論文標題 Specific Recognition of Flavin-derivative-wrapped Semiconducting Single-walled Carbon Nanotubes Based on a Chiral Selective Chemical Reaction	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Bull. Chem. Soc. Jpn	6. 最初と最後の頁 1646-1651
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/bcsj.20180206	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 M. R. Berber, T. Fujigaya, N. Nakashima	4. 巻 10
2. 論文標題 Potential Polymer formulation of a Durable Carbon-black Catalyst with a Significant Fuel Cell Performance over a Wide Operating Temperature Range	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Materials Today Energy	6. 最初と最後の頁 161-168
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.mtener.2018.08.016	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 T. Shiraki, T. Shiga, N. Nakashima, T. Fujigaya	4. 巻 24
2. 論文標題 Multistep Wavelength Switching of Near-infrared Photoluminescence Driven by Chemical Reactions at Local Doped Sites of Single-walled Carbon Nanotubes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Chem. Eur. J	6. 最初と最後の頁 19162-19165
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/chem.201805342	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 H. Onitsuka, T. Fujigaya, N. Nakashima, T. Shiraki	4. 巻 24
2. 論文標題 Control of the Near Infrared Photoluminescence of Locally Functionalized Single-Walled Carbon Nanotubes via Doping by Azacrown-Ether Modification	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Chem. Eur. J.	6. 最初と最後の頁 9393-9398
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/chem.201800904	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 J. Yang, F. Toshimitsu, T. Fujigaya, N. Nakashima	4. 巻 5
2. 論文標題 Pristine carbon nanotube/iron phthalocyanine hybrids with a well-defined nanostructure show excellent efficiency and durability for oxygen reduction reaction	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 J. Mater. Chem. A	6. 最初と最後の頁 1184-1191
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C6TA07882F	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 J. Yang, T. Fujigaya, N. Nakashima	4. 巻 201
2. 論文標題 Decorating unoxidized-carbon nanotubes with homogeneous Ni-Co spinel nanocrystals show superior performance for oxygen evolution/reduction reactions	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 45384
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/srep45384	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 T. Fujigaya, Y. Shi, J. Yang, H. Li, K. Ito, N. Nakashima	4. 巻 5
2. 論文標題 A highly efficient and durable carbon nanotube-based anode electrocatalyst for water electrolyzers	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 J. Mater. Chem. A	6. 最初と最後の頁 10584-10590
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/c7ta01318c	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 T. Shiraki, S. Uchimura, T. Shiraishi, N. Nakashima	4. 巻 53
2. 論文標題 Near Infrared Photoluminescence Modulation by Defect Site Design Using Aryl Isomers in Locally Functionalized Single-walled Carbon Nanotubes	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 ChemComm	6. 最初と最後の頁 12544-12547
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C7CC06663E	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 T. Shiraishi, T. Shiraki, N. Nakashima	4. 巻 9
2. 論文標題 Substituent Effects on the Redox States of Locally Functionalized Single-Walled Carbon Nanotubes Revealed by in situ Photoluminescence Spectroelectrochemistry	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nanoscale,	6. 最初と最後の頁 16900-16907
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C7NR05480G	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 13.J. Yang, F. Toshimitsu, T. Fujigaya, N. Nakashima	4. 巻 5
2. 論文標題 Pristine carbon nanotube/iron phthalocyanine hybrids with a well-defined nanostructure show excellent efficiency and durability for oxygen reduction reaction	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 J. Mater. Chem. A	6. 最初と最後の頁 1184-1191
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C6TA07882F	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 J. Yang, T. Fujigaya, N. Nakashima	4. 巻 7
2. 論文標題 Decorating unoxidized-carbon nanotubes with homogeneous Ni-Co spinel nanocrystals show superior performance for oxygen evolution/reduction reactions	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Sci. Rep.	6. 最初と最後の頁 45384
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/srep45384	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 -

[学会発表] 計25件(うち招待講演 8件/うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Pandian Ganesan,, Aleksandar Staykov,,Hiroaki Shu, 上島 貢, 中嶋直敏
2. 発表標題 カーボンナノチューブを素材とした貴金属を使わない新しい高性能電池触媒デザイン
3. 学会等名 日化102回春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Pandian Ganesan, Aleksandar Staykov, Hiroaki Shu, 上島 貢, 中嶋直敏
2. 発表標題 Carbon Nanotubes as Materials for Non-precious Metal Electrocatalysts with High ORR and OER Performances and their Applications
3. 学会等名 62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 Pandian Ganesan,, Aleksandar Staykov,,Hiroaki Shu, 上島 貢, 中嶋直敏
2. 発表標題 カーボンナノチューブを用いた白金フリー電池触媒のデザイン・作製
3. 学会等名 89回電気化学会春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Aleksandar Staykov, Naotoshi Nakashima
2. 発表標題 貴金属を使わないFe/Ni/S系高性能酸素還元・酸素発生触媒の構築と応用
3. 学会等名 2021年 電気化学会第88回大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Aleksandar Staykov, Naotoshi Nakashima
2. 発表標題 Design and Fabrication of Carbon Nanotube-based Non-precious Metal Electrocatalysts with High ORR and OER Performances and their Applications
3. 学会等名 第60回FNTG学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Jin Nishida, Junko Matsuda, Naotoshi Nakashima
2. 発表標題 Carbon nanotube-based PMG-free Electrocatalysts with High OER and ORR Activities
3. 学会等名 PRiMe 2020/ ECS Meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中嶋直敏
2. 発表標題 A simple way for preparation of catalysts with homogeneous nano-metal and metal oxides on nanocarbons: Fundamental and applications for energy conversion
3. 学会等名 Invited seminar at Taiwan University of Science and Technology (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jun Yang, Junfang Cheng、中嶋直敏
2. 発表標題 貴金属を用いない高性能燃料電池/水分解触媒のデザインと電気化学分析
3. 学会等名 第79回分析化学討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jin Nishida, Jun Yang, Shunsuke Uchimura, Junko Matsuda, Naotoshi Nakashima
2. 発表標題 ナノカーบอนを素材とした貴金属を用いない高性能電池触媒の合成
3. 学会等名 2019電気化学秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jin Nishida, Jun Yang, Shunsuke Uchimura, Junko Matsuda, Naotoshi Nakashima
2. 発表標題 Carbon Nanotube-based Non-precious Metal Electrocatalysts with High Performance and Durability
3. 学会等名 236th ECS meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Naotoshi Nakashima
2. 発表標題 Nanocarbon-based Non-precious Metal Catalysts with High Performance
3. 学会等名 18th Asian Chemical Congress : ACC2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jin Nishida, Jun Yang, Shunsuke Uchimura, Junko Matsuda, Naotoshi Nakashima
2. 発表標題 ナノカーบอนを素材とした貴金属を用いない高性能電池触媒のデザイン、合成
3. 学会等名 第68回高分子討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Naotoshi Nakashima
2. 発表標題 Two Different Carbon Nanotube-based Non-Pt Fuel Cell Catalysts with High Performance and Durability
3. 学会等名 233rd Electrochemical Society Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 N. Nakashima
2. 発表標題 A Method to Fabricate Nanocrystals of Metal Oxides on Carbon Nanotube Surfaces
3. 学会等名 234th Electrochemical Society Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中嶋直敏
2. 発表標題 Tiナノチューブ上に形成された高性能Irベース水分解触媒のデザイン、合成
3. 学会等名 56回フラーレンナノチューブグラフェンシンポジウム'
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中嶋直敏
2. 発表標題 Tiナノチューブ上に形成された高性能Irベース水分解触媒のデザイン、合成
3. 学会等名 日本化学会 第99春季年会 (2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Nakashima
2. 発表標題 Molecular Requirement for Compounds Toward Facile Isolation of Adsorbent-Free Semiconducting Single-walled Carbon Nanotubes Based on Supramolecular Chemistry
3. 学会等名 233th Electrochemical Society Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中嶋直敏
2. 発表標題 エネルギー変換材料としてのカーボンナノチューブ
3. 学会等名 セラミック協会第31回秋季シンポジウム2018 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 N. Nakashima
2. 発表標題 Facile Isolation of Adsorbent-Free Long Semiconducting Single-walled Carbon Nanotubes Based on Supramolecular Chemistry
3. 学会等名 231st Electrochemical Society Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 N. Nakashima
2. 発表標題 Carbon Nanotube-based “ Immortal ” and Non-precious Metal Fuel Cell Catalysts
3. 学会等名 Invited semina at Daegu Gyeongbuk Institute of Science and Technology (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 N. Nakashima
2. 発表標題 Carbon Nanotubes As an Advanced Functional Nanomaterial -Current and Future-
3. 学会等名 23rd Joint Seminar of the Busan Branch of the KCS and the Kyushu Branch of the CSJ (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中嶋直敏
2. 発表標題 カーボンナノチューブを素材とする革新的エネルギー材料創生
3. 学会等名 ファインケミカルジャパン2017 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中嶋直敏
2. 発表標題 先端ナノ材料としてのカーボンナノチューブー基礎ならびにエネルギー材料への応用ー
3. 学会等名 電気化学会秋季年会2017 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 N. Nakashima
2. 発表標題 Facile Isolation of Adsorbent-Free Long Semiconducting Single-walled Carbon Nanotubes Based on Supramolecular Chemistry
3. 学会等名 231st Electrochemical Society Meeting
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 N. Nakashima
2. 発表標題 Carbon Nanotubes As an Advanced Functional Nanomaterial -Current and Future-
3. 学会等名 23rd Joint Seminar of the Busan Branch of the KCS and the Kyushu Branch of the CSJ
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 N. Nakashima	4. 発行年 2018年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 564
3. 書名 Nanocarbons for Energy Conversion-Supramolecular Approaches	

〔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	白木 智丈 (Shiraki Tomohiro) (10508089)	九州大学・工学研究院・准教授 (17102)	

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