

令和 5 年 5 月 25 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H02174

研究課題名（和文）前駆体の精密設計に基づく二次元窒化炭素構造体の薄膜形成と光応答型膜反応器への応用

研究課題名（英文）Thin film formation of two-dimensional carbon nitride structure based on precisely-designed precursors and its application toward photoactive membrane reactors

研究代表者

野田 啓 (NODA, Kei)

慶應義塾大学・理工学部（矢上）・教授

研究者番号：30372569

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：まず、窒素含有量の多い新しい窒化炭素（C₃N₅）の合成に取り組んだ結果、従来の材料よりも優れた可視光応答性を示した。また、酸化タンゲステン（WO₃）ナノロッドとC₃N₅の複合体を形成することで、水分解水素生成の性能が飛躍的に向上し、WO₃とC₃N₅との界面におけるZ-スキーム反応機構が寄与することを示した。

さらに、比表面積の大きい酸化チタン（TiO₂）ナノチューブアレイ表面に対し、熱化学気相成長（CVD）法を用いて二次元窒化炭素を均一に堆積させることに成功した。その結果として、紫外可視光照射に伴う水素生成量が大きく増大し、光応答型膜反応器の構築に向けて、熱CVD法が有効であることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、ワイドギャップ半導体材料を用いた人工光合成（太陽光水素生成や二酸化炭素光還元）の研究開発が世界各地で活発に展開されている。本研究では、高分子半導体でもあり、炭素と窒素のみから成る金属フリーな窒化炭素材料を活用して、その薄膜形成技術や人工光合成反応に関する新しい知見を得るとともに、高機能光応答膜反応器の実現に向けた有益な成果を得ることができた。これらの成果は太陽エネルギーの有効利用やCO₂削減等に寄与し得る、社会的に意義のあるものと言える。

研究成果の概要（英文）：Our newly-synthesized C₃N₅, which is one of the nitrogen-abundant carbon nitrides, showed a hydrogen (H₂) production amount larger than that of conventional graphitic carbon nitride (g-C₃N₄) in photocatalytic water splitting with triethanolamine under visible light irradiation. Besides nanocomposites of tungsten trioxide (WO₃) nanorods and C₃N₅ brought about further improvement in photocatalytic H₂ production, which can be attributed to a direct Z-scheme mechanism.

In addition, g-C₃N₄ was uniformly deposited on the surfaces of anodized TiO₂ nanotube arrays by thermal chemical vapor deposition (CVD), leading to the enhancement of photocatalytic H₂ production over TiO₂ under ultraviolet-visible light irradiation. Thermal CVD enables conformal deposition of graphitic carbon nitrides on surfaces with large specific surface areas. Our results observed for TiO₂/g-C₃N₄ composites indicate that thermal CVD is effective for constructing photoactive membrane reactors with carbon nitrides.

研究分野：電子・電気材料工学

キーワード：二次元窒化炭素 ナノ材料 光エネルギー変換

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、ワイドギャップ半導体材料の光触媒機能による人工光合成(太陽光水素生成や二酸化炭素(CO₂)光還元など)の研究開発が進展する中で、グラフェン等と同様な形状を有する有機系二次元材料である高分子状窒化炭素が新材料として注目を集めている。その大半がまだ合成例のない理論上のものであるが、実際に合成されている g-C₃N₄ ではバンドギャップエネルギーが可視光領域に存在することに加え、高い還元力と優れた大気安定性を示し、環境に与える毒性もきわめて少ないことから近年、活発に研究されている。しかしながら、光照射により生成した電子と正孔が再結合しやすい、電荷キャリア移動度が小さいといった短所が未解決のまま数多く存在している。更に、合成例のない他の窒化炭素では理論研究が先行しており、新規合成によって可能となる各種物性の実験的検証によって、高分子状窒化炭素における諸物性の体系的な理解につながる事が強く期待されている。

(2) 研究代表者はこれまでに、酸化物半導体ナノ構造の形成、ならびにそれらが有する光触媒機能の可視光応答化や反応過程の追跡に関わる研究を推進してきた。その中で有機系の可視光応答型光触媒として有望な g-C₃N₄ の研究動向も注視し続けてきた。g-C₃N₄ の光電子機能や光触媒活性の基本性能は年々向上しているものの、その試料形態は粉末状のものに限定されていた。もし、簡便で大面積な薄膜状の g-C₃N₄ を得ることができれば、光電材料分野や電極、有機半導体デバイス(光センサやトランジスタ)などへの応用範囲の拡大が期待できる。しかしながら、そのような薄膜試料の作製例は存在するものの、既報の結果では、窒化炭素の合成過程の制御が不十分であると推察されるため、理論的な手法での前駆体化合物の設計、新規合成を行い、それらを使って成膜条件を綿密に制御すれば、高品質な二次元窒化炭素の薄膜成長を実現できる可能性が示されていた。

2. 研究の目的

窒化炭素の幾何学的形状制御に適した前駆体分子を量子化学的な観点から新規に設計、合成するとともに、それらも含めた前駆体による気相成長からの二次元窒化炭素構造体の薄膜形成を実施する。高効率な光吸収と電荷分離機構を有する窒化炭素薄膜の作製条件を探索し、分子構造及び薄膜構造の制御に関する指針を得る。本研究での成果を基に、貴金属助触媒フリーな人工光合成の実現と光応答型膜反応器(メンブレンリアクター)への応用を目標とした研究を遂行する。

3. 研究の方法

(1) 二次元窒化炭素構造体は、原料となる前駆体モノマーとして何を使用するかによってその組成や構造がおおよそ定まる。したがって多様な電子状態を有する二次元窒化炭素構造体を合成するためには、メラミン・シアナミドなど既存の含窒素有機分子のみならず、分子設計に基づく新規な前駆体モノマー分子の開発が必要であり、拡張π共役系有機分子ユニットを導入した窒素リッチな新規前駆体の分子設計やそれに基づく新規モノマー合成の検討を行う。特に電気化学的に電子状態変調を可能とする二次元窒化炭素構造体の新規開発を視野に入れ、レドックス能を有する前駆体分子の開発を行う。二次元窒化炭素構造体における幾何学的形状制御を可能とするためには、C₃対称性を有する形状のモノマー分子や、井形状に反応性置換基が置換した形を有するモノマー分子が適切であり、このような幾何学的特徴を有する前駆体分子を中心に窒素リッチなπ電子系有機分子化合物群の探索・開発を行う。

(2) 上記で設計される新規前駆体分子や既存の前駆体材料を用いて、熱化学気相成長(CVD)法を主体とした窒化炭素構造体の作製を進める。形成される試料の構造評価(X線回折、赤外・ラマン分光、X線光電子分光など)や光電子物性評価(吸収スペクトル測定、光電気化学測定、XPS価電子帯スペクトル測定など)を行い、前駆体の種類と試料の成長条件との相関を明らかにし、高効率な光吸収と電荷分離性能を有する窒化炭素構造体の作製の指針を得る。また、励起子からのより高度な電荷分離機構を有する貴金属フリー材料の開発を目指して、窒化炭素構造体と他の酸化物半導体ナノ構造を組み合わせたヘテロ接合系の作製を進める。

(3) 走査プローブ技術の一手法である、ケルビンプローブ原子間力顕微鏡(KPFM)を用いた窒化炭素薄膜と金属界面における表面電位測定を実施する。窒化炭素薄膜全般において、その電子物性や光照射に伴う表面現象、励起されたキャリアの挙動などについても、詳細は未解明である。本研究では高感度な電位検出法として位相変調(PM)方式を採用し、試料表面への光照射下での表面形状/表面電位の同時観察により、窒化炭素薄膜における局所的な電子状態や電荷分離機構に関する知見を得る。

(4) 上記の研究項目で見出される窒化炭素構造体を用いて、まずは粉末状の試料に対して、犠牲剤を含む水からの光触媒水素生成の評価を行う。それと並行して、光応答型膜反応器への適

用を念頭に置いて、基板に予め形成された酸化物半導体ナノ構造と窒化炭素との複合体を熱CVD法によって作製し、その光触媒水素生成能の評価を進める。測定セルやガスクロマトグラフィーを介したガス循環系を新たに構築し、発生する水素ガスなどの定量評価を通じて、窒化炭素の材料開発に有益となるデータを取得するとともに、光応答型膜反応器としての構造及び動作条件の最適化を推し進める。

4. 研究成果

(1) 前駆体モノマー分子系の開発に関しては、(i) フェナジンを構成単位とするアザアセン型のレドックス活性分子系、(ii) ヘキサアザトリフェニレン (HAT) を窒化炭素コア部分とするレドックス活性分子系に注目して合成経路の確立を図るべく検討を行った。こうした窒素リッチな π 電子系有機分子の合成においては、パラジウム系触媒を活用するクロスカップリング反応が阻害されるようなケースもあったが、概ね合成経路の確立が達成できたものと考えている。これら開発分子系は一般的な有機溶剤に可溶であり、レドックス反応に伴い発生した電荷/スピンの分子全体に非局在化することが判明し、前駆体分子系として様々なプロセスでレドックス活性な二次元窒化炭素構造体を作製可能な前駆体分子系となり得ることが明らかになった。加えて、レドックス活性中心として導入したパラフェニレンジアミン部位の電子供与性を反映して、HOMO-LUMOギャップを制御することが可能であることがわかり、こうした分子系を前駆体として用いることにより、光触媒機能を有する窒化炭素半導体材料におけるエネルギーギャップの制御が可能であることを示唆する結果が得られた。また、ハロゲン基などの反応性置換基が置換したHAT系分子については、熱処理による二次元窒化炭素合成検討も実施した。

(2) これまでの二次元窒化炭素材料が主として、 s -トリアジンやトリ- s -トリアジン(ヘプタジン)骨格を基本とした構造を有している点に着目し、 $[n]$ アジン系分子の電子状態の特徴について明らかにするために量子化学計算を実施した。その結果、 $[12]$ アジン以上の類縁体は、開殻電子構造を持つものが存在し、二次元分子平面が局所的に凹凸している構造となっていることが予測された。こうした知見はこれまでの二次元窒化炭素材料の構造的特徴としては見過ごされてきたことであり、今後の前駆体分子設計において有益な情報を与えるものと考えられる。一方、6員環状芳香族分子として窒素原子を最大に含有する s -テトラジンを主骨格とし、レドックス中心として芳香族アミンを組み込んだ形の前駆体分子系の開発も実施した。結果として s -テトラジンの3位、6位の位置に選択的に芳香族アミンを導入することに成功した。また、これらの開発分子系は一般的な有機溶剤に可溶であり、レドックス反応に伴い発生した電荷/スピンの分子全体に非局在化することを示唆する結果が得られた。官能基二置換 s -テトラジン誘導体を二次元窒化炭素構造体の前駆体分子系として利用することで、新規な構造を有する C_3N_5 を凌駕する窒素リッチな二次元窒化炭素材料作製の可能性を拓くことができた。

(3) 膜状試料を合成する前段階として、 g - C_3N_4 及び窒素リッチな新材料である C_3N_5 に着目し、それらの粉末試料の合成と光触媒水素生成の評価を行った。 g - C_3N_4 はメラミンを、 C_3N_5 は3-アミノ-1,2,4-トリアゾールを前駆体として、それらを熱処理することで各窒化炭素の粉末試料を合成した。その後、それらの試料をトリエタノールアミンの20%水溶液に入れ、可視光照射(波長385~740nm)に伴い発生する水素(H_2)の生成量をガスクロマトグラフィーによって評価した。その結果、図1に示すように両試料とも可視光照射下での光触媒水素生成が可能であり、かつ C_3N_5 は g - C_3N_4 と比較して約2倍の水素生成速度を示すことが確認された。その後、電気化学測定やX線価電子帯スペクトル測定などから C_3N_5 では g - C_3N_4 と比較して、エネルギーバンドにおける価電子帯の上端が引き上げられる形でバンドギャップが狭くなることが判明した。 C_3N_5 のバンドギャップが水分解に影響しないレベルで小さくなり、 g - C_3N_4 よりも可視光応答性が向上し、より効率的に光触媒水素生成が生じたものと考えられる。

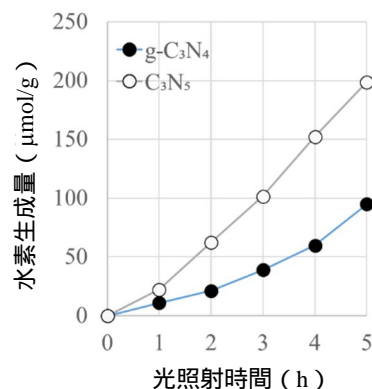


図1. g - C_3N_4 及び C_3N_5 を用いた光触媒水素生成評価結果.

(4) C_3N_5 が金属酸化物光触媒に対する助触媒としても有望であることを示すための実験を遂行した。ここでは、水熱合成で作成したナノロッド状の酸化タングステン(WO_3)に対し、 C_3N_5 や g - C_3N_4 を複合化させることで、可視光応答性に富むZ-スキーム型光触媒を合成した。まず、 WO_3 の前駆体であるタングステン酸ナトリウム二水和物と塩化ナトリウムを純水に溶かした後、塩酸を加えてpHを調整し、この溶液をオートクレーブ容器に移して、マッフル炉で熱処理を行った。熱処理後の試料は純水とメタノールで交互に遠心分離で洗浄し、大気下で真空乾燥して粉末状の WO_3 水和物を得た。さらに、得られた WO_3 水和物に対して、別途合成した C_3N_5 や g - C_3N_4 を加えてすり鉢で粉碎しながら混ぜ合わせた。最後に、この混合粉末試料を大気下で熱処理することによって複合体光触媒を得た。その後、得られた複合体材料をトリエタノール

アミン 20 % 水溶液に入れて攪拌させ、可視光 (385 ~ 740 nm) を照射した時の水素生成量をガスクロマトグラフィによって測定した。C₃N₅ 単体、C₃N₄/WO₃、C₃N₅/WO₃、Pt 担持 WO₃ (Pt/WO₃) の 4 試料で比較した結果、図 2 に示すように C₃N₅/WO₃ を用いた際の水素生成量が最大となった。また、透過型電子顕微鏡 (TEM) とエネルギー分散型 X 線分析 (EDX) による元素マッピングより、水熱合成法で作製したナノロッド状 WO₃ の周囲に纏わりつくような形で C₃N₅ が接合している様子が確認された。以上の結果を基に、合成した複合体光触媒 C₃N₅/WO₃ では Z-スキーム型のヘテロ接合が形成され、光誘起電荷の分離が効率的に生じていることが示唆された。これらの結果より、窒化炭素材料が還元力に優れた、金属フリーな助触媒としても機能することが実証された。

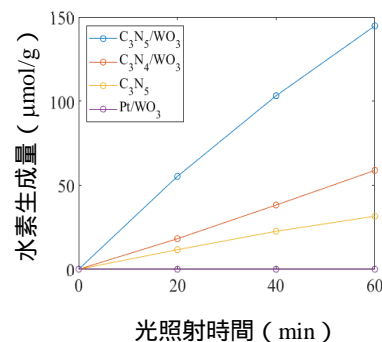


図 2. 各試料の可視光照射下での光触媒水素生成評価結果。

(5) 走査プローブ技術による窒化炭素材料の表面電位計測においても、興味深い知見が得られた。マイカ基板上に形成した金薄膜表面に 3-アミノ-1,2,4-トリアゾールを載せ、大気下、500°C の条件で加熱することで C₃N₅ を合成した。その後、C₃N₅ が堆積された基板に超音波処理を施すことで余分な C₃N₅ の除去を行い、金薄膜上に堆積された C₃N₅ 薄膜試料を得た。実際に紫外可視吸収測定から、C₃N₅ 粉末試料と同程度のバンドギャップ (1.93 eV) を有することを確認した。続いて KPFM を用いて試料の表面形状と表面電位の同時観察を行い (図 3)、金薄膜表面と共に、細かい粒状グレインから成る厚さ数十 nm 程度の C₃N₅ 薄膜が堆積されていることを確認した。また、厚さ 40 nm の C₃N₅ 薄膜上の表面電位 (暗時、大気下) を計測したところ、金表面よりも 140 mV 低く、金と C₃N₅ との界面に電位差があることが示唆された。その後、波長 300 ~ 400 nm の紫外光を試料表面に照射しながら表面電位の時間変化を追跡した結果、金上の表面電位は光照射による変化を示さないのに対し、C₃N₅ の表面電位は光照射によって約 40 mV 減少した (図 4)。これは、C₃N₅ 膜中に生じた光誘起キャリアが分離し、電子が C₃N₅ 側に蓄積したためであると推測される。このように、光照射下での C₃N₅ の表面電位の変化から、金/C₃N₅ 界面における光誘起キャリアの生成と分離を確認するに至った。

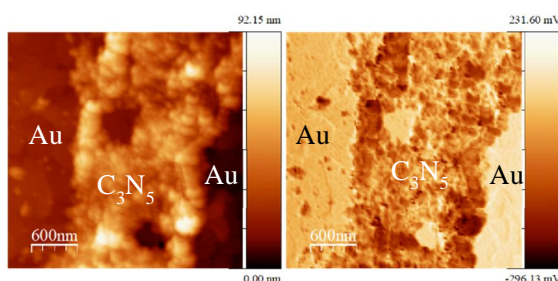


図 3. Au 薄膜上 C₃N₅ 膜状試料の表面形状像 (左図) と表面電位像 (右図)。

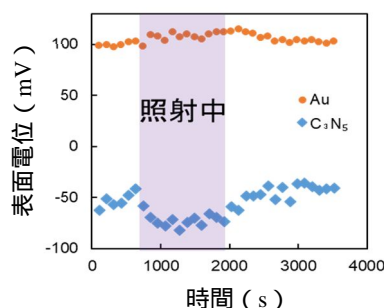


図 4. 光照射前後での C₃N₅ 膜状試料の表面電位の時間変化。

(6) 窒化炭素の薄膜形成に向けて、管状炉を基にした熱化学気相成長 (CVD) 装置 (図 5) を新たに導入した。まず、g-C₃N₄ の前駆体として有名なメラミンを使用し、g-C₃N₄ の薄膜形成を試みた。本熱 CVD 装置の管状炉内においてシリコン基板を所定の位置に設置し、前駆体飛行領域及びシリコン基板位置の温度設定の後、前駆体であるメラミンを昇華させ、キャリアガス (Ar) を用いてシリコン基板上へと輸送し g-C₃N₄ 薄膜を合成した。その結果、膜厚 130 nm の薄膜に対する X 線回折結果より、g-C₃N₄ シートの積層を示す (002) 面の回折ピークが出現し (図 6) g-C₃N₄ が形成されていることを確認した。さらにシリコンなどの平坦な基板上であれば、膜厚 10 nm 以下の g-C₃N₄ 超薄膜が形成可能であることを実証した。その後、作製した g-C₃N₄ 薄膜に助触媒として白金 (Pt) 粒子を DC スパッタリングにより堆積させた試料において、可視光応答の光触媒活性を有することをメチレンブルー (MB) 分解測定により確認した (図 7)。

(7) (6) の結果を受けて、窒化炭素の光応答型膜反応器への適用を想定し、Ti 基板上に形成した酸化チタン (TiO₂) ナノチューブアレイ (TNA) と g-C₃N₄ との複合体を、上記の熱 CVD 装置を用いて作製し、その光触媒活性評価を行った。作製した TNA/g-C₃N₄ 複合体試料をテレフタル酸水溶液中に浸漬した後、紫外可視光 (波長 300 ~ 600 nm) 照射によって発生した水酸基ラジカル (·OH) を検出した結果を図 8 に示す。·OH を捕捉して生成された 2-ヒドロキシテレフタル酸 (TAOH) の蛍光 (波長 426 nm) が確認され、かつより少ない前駆体質量 (0.2 g) で作製した TNA/g-C₃N₄ 試料において、TNA 単体試料における蛍光強度を上回る結果となった。ま



図 5. 管状炉熱 CVD 装置の概略図 .

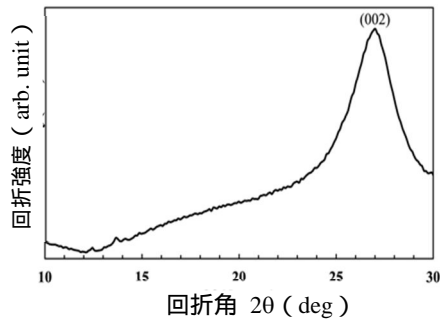


図 6. g-C₃N₄ 薄膜試料の X 線回折測定結果 .

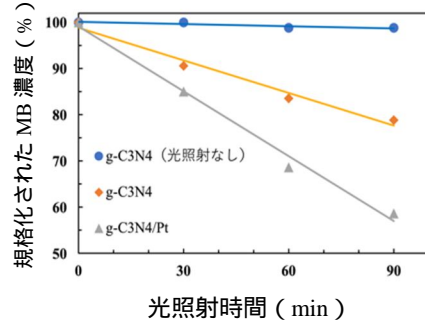


図 7. g-C₃N₄ による MB 光触媒分解測定結果 . 光照射開始時を $t=0$ とした .

た、この TNA/g-C₃N₄ 試料を、メタノール 30% を含む水中に入れ、紫外可視光 (波長 300 ~ 600 nm) 照射に伴い発生する水素 (H₂) の生成量をガスクロマトグラフィーによって定量的に評価した。その結果、TNA 単体試料よりも約 2.7 倍の水素生成量を得ることができた (図 9)。これらの結果は、熱 CVD を用いた g-C₃N₄ による表面修飾によって、TiO₂ と g-C₃N₄ の受光表面積のバランスが保たれ、かつ TNA/g-C₃N₄ 界面において Z スキームが構築されたためと推測される。このように、熱 CVD を用いることで、比表面積の大きい、あるいはアスペクト比の大きい微細構造体を有する基板表面に対しても窒化炭素のコンフォーマルな堆積が可能であり、光応答型膜反応器の構築に向けて、熱 CVD が有効であることが示された。

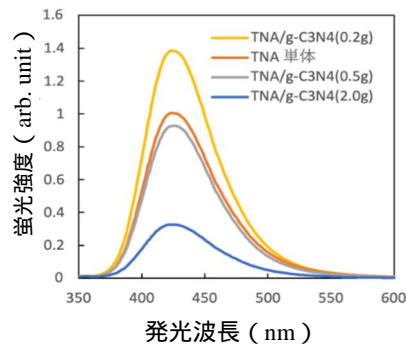


図 8. TNA/g-C₃N₄ 複合体を用いた光酸化力測定結果 (TAOH による蛍光測定結果) . (括弧内に記載の質量は前駆体量を示す)

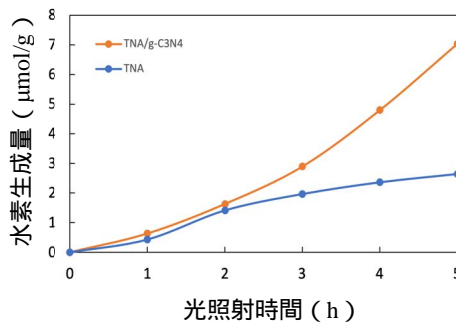


図 9. TNA/g-C₃N₄ 複合体と TNA 単体を用いた紫外可視光照射下での光触媒水素生成評価結果 .

(8) 一方で、新規に合成された前駆体分子を用いた薄膜形成では、残念ながら均一に堆積された膜状試料を得ることができなかった。熱 CVD 法では大量の前駆体粉末試料が必要とするが、実際の分子合成がそれに追いつかず、実験の試行回数を稼ぐことが困難となった。また、使用する前駆体分子の変更に伴い、熱 CVD 法における成膜制御パラメータ (温度、時間、真空度など) を全て一から出し直す必要が生じるため、試行できる前駆体分子の種類にも限りが出てしまった。しかし、本課題の実施期間で得られた成膜に関する知見やノウハウを活用すれば、今後、より短期間で他の二次元窒化炭素構造体の成膜へと結び付けられることが大いに期待できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 MASEGI Hikaru, DOI Naoyuki, YONEYAMA Sho, NODA Kei	4. 巻 60
2. 論文標題 Visible light responsive photocatalytic hydrogen production over composites of anodized TiO ₂ nanotube array and graphitic carbon nitride measured with a gas circulating reactor	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 105504 ~ 105504
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ac23ef	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 UEBE Masashi, KANEDA Kensuke, FUKUZAKI Shinya, ITO Akihiro	4. 巻 25
2. 論文標題 Bridge-length-dependent intramolecular charge transfer in bis(dianisylamino)-terminated oligo(p-phenylene)s	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Chemistry A European Journal	6. 最初と最後の頁 15455-15462
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/chem.201903667	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16件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 ITO Kosei, NODA Kei
2. 発表標題 Structural analysis and photocatalytic hydrogen production of C ₃ N ₅
3. 学会等名 The 19th Korea-Japan Symposium on Catalysis (KJSC)（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 船戸友菜、笛野博之、小塩明、伊藤彰浩
2. 発表標題 ピレン骨格を含むテトラアザシクロファン合成と電子的性質
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 伊藤皇聖、野田 啓
2. 発表標題 C3N5の構造解析と光触媒水素生成の評価
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 藤岡秀太、伊藤皇聖、内田涼太、野田 啓
2. 発表標題 Z-スキーム型可視光応答光触媒C3N5/WO3の水素生成量向上
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 西尾翔太、飯田悠介、小林 圭、野田 啓
2. 発表標題 窒素リッチな高分子状窒化炭素薄膜における光照射下での表面電位像観察
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 NODA Kei
2. 発表標題 Gas phase photocatalytic CO ₂ reduction and H ₂ production over anodized nanotube arrays
3. 学会等名 International Conference on Materials Science and Engineering 2022 (Materials Oceania 2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 五藤隼登、一方井 遼佑、野田 啓
2. 発表標題 熱化学気相成長で合成した二次元窒化炭素膜の可視光応答光触媒活性
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 米山 翔、伊藤 皇聖、柵木 光、野田 啓
2. 発表標題 管状炉熱CVDで作製した酸化チタンナノチューブアレイ/窒化炭素複合体の光触媒活性評価
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 米山翔、柵木光、野田 啓
2. 発表標題 管状炉を用いた熱 CVD 法による酸化チタンナノチューブアレイ/窒化炭素複合体の構造制御
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤皇聖、野田啓
2. 発表標題 窒素リッチなグラファイト状窒化炭素の作製とその評価
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 NODA Kei
2. 発表標題 Gas phase photocatalytic hydrogen production over vertically aligned nanotubular arrays prepared with electrochemical anodization
3. 学会等名 Symposium H-3 (Innovative Process and Materials Design via a Comprehensive Multiscale or Nano/Micro/Macro-Scale Fabrication Approach), Materials Research Meeting 2021 (MRM 2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 柵木光、土井直之、野田啓
2. 発表標題 可視光触媒活性向上に向けた二酸化チタンナノチューブアレイ/窒化炭素複合体の形成
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 野田啓
2. 発表標題 二次元窒化炭素の可視光応答光触媒機能とその応用
3. 学会等名 シンポジウム「カーボンニュートラルに向けて有機分子・バイオエレクトロニクスができること」、第82回応用物理学会秋季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡邊祐太、檀上悠斗、野田啓
2. 発表標題 熱化学気相成長による二次元窒化炭素薄膜の作製と可視光応答性評価
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡本大矢、野田啓
2. 発表標題 強酸処理したグラファイト状窒化炭素試料における構造評価
3. 学会等名 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 岡本大矢、野田啓
2. 発表標題 グラファイト状窒化炭素から成る二次元ナノシートの化学的剥離
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020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	伊藤 彰浩 (ITO Akihiro) (90293901)	三重大学・工学研究科・教授 (14101)	

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