

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：56101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25390034

研究課題名(和文) 気相成長自己組織化複合ナノ構造を有する可視光応答型光触媒の創製

研究課題名(英文) Synthesis of visible-light-driven photocatalysts with self-organized composite nanostructures grown in gas phase

研究代表者

吉田 岳人 (Yoshida, Takehito)

阿南工業高等専門学校・その他部局等・教授

研究者番号：20370033

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、気相反応性パルスレーザーアブレーション(PLA)法を用いた、光触媒(TiO₂)ナノ結晶を創成の際に、2次凝集体の自己組織化構造の形成に注目した。プロセス条件の制御により、これまで主流に用いていたカリフラワ構造に加えて、ウップ構造が自己組織的に発現することを確認した。このウップ構造はカリフラワ構造と比較して、高いポロシティを有し、紫外励起の光触媒活性評価で3-4倍の値を示すことを検証した。TiO₂のウップ構造は、気相で形成され始めた、2次凝集体間の誘電分極による静電引力・斥力による自己組織化構造であるとするモデルを立てた。

研究成果の概要(英文)：Pulsed laser ablation (PLA) in vapor-phase is a candidate process to synthesize nanocrystallites with controlling not only their crystal structures but also agglomeration structures. In this study, we prepared TiO₂ nanocrystallites agglomerated in self-organized web-structures by the PLA in O₂ background gas. Paying attention to influence of the self-organized agglomeration structures on photocatalytic activities (PCA). Si substrates on which the TiO₂ nanocrystallites deposited, in methylene blue aqueous solution, were irradiated by an UV excitation light. It was confirmed that the web-like structures were about 3-4 times higher than the cauliflower structures. We can conclude the web structures had high porous relating larger specific surface area, in comparison with the cauliflower structures.

研究分野：半導体素子工学

キーワード：パルスレーザーアブレーション法 気相成長 非熱平衡 ナノ結晶 複合ナノ構造 自己組織化 光触媒 電荷分離

1. 研究開始当初の背景

持続的発展が可能な工業社会を実現するためには、環境保全が最優先である。しかしながら、エネルギー源を埋蔵燃料に依存している限りは、枯渇と汚染放出から逃れることはできない。その汚染は、CO₂を中心とした温室効果ガス排出、NO_x/SO_xによる酸性雨、有害粒状物質の排出、放射性廃棄物の生成・拡散等々、地球環境保全を脅かす深刻なものである。有害物質の除去において不可欠な機能材料が触媒粒子である。またエネルギー供給を持続的かつクリーンに行うシステムの構築は、東日本大震災以降、喫緊の最重要課題であることが再認識された。多元系酸化材料を用いた可視光誘起で、メタノールのみならず水を分解することで、クリーンエネルギー（燃料：H₂）を継続的に供給することのできる触媒が、世界で初めて報告されて以降（In_{1-x}Ni_xTaO₄: Z. Zou et al., Nature 414, 2001.）、この分野の研究が注目されてきた。しかしながらこれまでの作製方法は、原料粉末の電気炉焼成といったバルクの熱平衡プロセスによるものが多く、触媒粒子の粒径は300-500nmのレベルが多かった。

研究代表者は、ナノ構造機能材料の創製法として、いち早く気相パルスレーザーアブレーション（PLA）法の開発に着手し、世界に先駆けて、Si ナノ結晶の生成と可視光発光性を実証するとともに、1次ナノ結晶の凝集構造を、稠密な薄膜から柱状構造を経て、カリフラワー/ファイバーといったポロシティの高い構造まで制御できることを検証した（T. Yoshida et al., Appl. Phys. Lett. 68, 1996., T. Yoshida et al., J. Appl. Phys. 83, 1998.）。またPLA プロセスにおいて発生する衝撃波を活用することで、非酸化性雰囲気中であっても、化学量論組成の金属酸化物ナノ結晶の低温基板成長が可能であることを解明した（Y. Yamada et al., J. Vac. Sci. & Technol. A.18, 2000.）。その後、非化学量論組成多元系金属酸化物半導体である In_{1-x}Ni_xTaO₄ のナノ単結晶（平均粒径 4.5nm：酸素欠損なし）の生成（T. Yoshida et al., Appl. Phys. A. 93, 961, 2008）、及びこれへの Ni ドープ（Ni と In の骨格置換）による可視光応答性の発現の確認をしている（T. Yoshida et al., Appl. Sur. Sci. 255, 9634, 2009）。さらに、In_{1-x}Ni_xTaO₄ ナノ結晶を主触媒とした場合に最適な助触媒とされる、NiO_x のナノ結晶薄膜の生成においても、良質な結晶性と半導体特性としての明瞭な光吸収端の確認をしている。最近では、TiO₂ ナノ結晶の生成において、簡単なプロセスパラメータの調整で結晶構造（アナターゼ/ルチル）の制御が可能であり、これが非熱平衡性の気相 PLA プロセスにおける冷却速度から説明できること、及び結晶性回復により、光触媒活性が向上することを実証した（T. Yoshida et al., Appl. Phys. A, 117, 223, 2014）。

2. 研究の目的

可視光誘起の水素生成光触媒ナノ粒子に注目して、研究代表者の進展状況を述べる。主触媒（正孔供与をする酸化サイト）と助触媒（電子供与をする還元サイト）となる、In_{1-x}Ni_xTaO₄ ナノ結晶と NiO_x ナノ結晶の個別の生成法までは到達しているものの、両者を合体・融合した、複合型の光触媒ナノ構造体の創製について未着手である。この複合化が最適に機能すると、可視光応答型光触媒において、特に水素発生を目的とした場合、量子効率として1桁の向上が期待できるとされている。

しかしながら、光触媒粒子をシングルナノ領域（10nm以下）に調製すると、比表面積（表面露出原子率）は格段に向上（約100m²/g）することで高活性が期待できるものの、キャリアの空間的閉じ込め効果あるいは酸化サイトと還元サイトの空間的距離が近すぎることにより、励起電子-正孔対の再結合率や逆反応レートが上がってしまうという問題が新たに発生する。そこで主触媒ナノ粒子と助触媒ナノ粒子の幾何学配置を、構造的に制御するなどのブレイクスルーが必要とされてくる。

多元系金属酸化物半導体触媒を創製するに当たって、まずは主・助触媒粒子の粒径・組成比・結晶性・モフォロジーを制御することが重要となる。気相反応性 PLA 法によれば、雰囲気ガスの種類と圧力に関する自由度が高いため、これらを適切に調整することで、シングルナノ領域で、しかも組成比・結晶性・堆積モフォロジーが制御された、多元系金属酸化物半導体を創製することが可能である。

次に主触媒と助触媒を合体・融合させた、複合光触媒ナノ構造体の創製法について述べる。その目的は、これまで述べたとおり、1)触媒粒子径をナノ化することで、比表面積を向上し高活性化する、2)効果的に励起キャリアの電荷分離を行い、キャリアの空間閉じ込めとナノ領域内に密集隣接する酸化・還元サイトによる電子-正孔対の再結合と逆反応を抑制する、というものである。まず堆積基板に、主触媒ナノ結晶粒子を、カリフラワー状のポロシティの高い2次凝集構造で100nmオーダーの厚さで堆積する（酸化サイト）。このモフォロジー制御は気相反応性 PLA 法においては、反応性ガスの圧力調整により可能である。次に、助触媒ナノ結晶を、主触媒ナノ結晶粒子堆積膜の上に、網目（ウェブ）状の2次凝集構造を有する状態で堆積する（還元サイト）ことで複合ナノ構造光触媒を創製する。網目（ウェブ）状の2次凝集構造の自己組織的成長が、気相反応性 PLA 法におけるプロセス条件の制御により実現できることはすでに確認している。この現象を拡散律速凝集現象（cluster-cluster agglomeration: CCA と呼ばれる）による、自己組織化構造の発現の観点から解明する。

さらに上記複合ナノ構造体の光触媒としての機能を検証する。可視光誘起により、メチレンブルー溶液の分解、メタノール溶液中での H₂ の発生を経て、純水の分解による H₂ 発

生を評価する。この過程で、酸化・還元サイトを、ナノ領域内で幾何学配置制御された複合ナノ構造光触媒において、効率的電荷分離と、それに伴うキャリア再結合と逆反応の抑制が機能しているか、そしてそれは酸化・還元サイトのナノ領域幾何学配置とどのような相関をもつかを検証・解析する。

【本研究の学術的な特色・独創的な点】

原子を非熱平衡プロセスによりビルドアップしてゆく、独自の気相反応性 PLA 法を用いれば、【1. 研究開始当初の背景】で述べたとおり、非化学量論組成の多元系酸化物ナノ結晶光触媒粒子を生成することが可能である。光触媒粒子をナノ化すると、比表面積が格段に向上することで、高活性化が期待できる。反面、キャリアの空間的閉じ込め効果が顕著となるため、励起電子-正孔対の再結合率が上がってしまう問題が生じる。この問題に対して、複合型（主助触媒混成）の光触媒を、自己組織化による独自のナノ構造体として創製することにより、電子-正孔のナノ粒子内再結合を抑制し、効果的な電子-正孔の電荷分離を可能とする。このことは、光触媒粒子のナノ化において、比表面積の増大を確保しつつキャリア再結合率の上昇を抑制することが可能となる。いわばナノ化において必然的に生じる二律背反問題の解決策と成りえるものである。この過程において、複合ナノ構造における主触媒ナノ結晶と助触媒ナノ結晶の幾何学的配置を調整することによって、電子-正孔電荷分離の機構を解明することも試みる。この際、助触媒 1 次粒子を気相 PLA プロセス中の CCA 現象を利用して、自己組織化凝集させることで幾何学的配置を制御するものである。さらに光触媒活性の評価としては高度な、可視光誘起の水素発生（ないし水分解）反応の確認をもって、効率的電荷分離発現の検証とする。

3. 研究の方法

(1)紫外域に吸収端をもつ多元系酸化物ターゲットに対応するため、励起光源として Q スイッチ Nd:YAG パルスレーザーの高調波を用いる。プロセスチャンパーとして、1)到達度 10-7Pa 以下で、数十~千 Pa の領域で O₂ 等を安定導入、2)多元系酸化物ターゲットの保持・回転機構を保有、3)生成粒子の捕集基板が設置、できるものを用いる。これらパルスレーザーとプロセスチャンパー装置の結合による気相反応性 PLA 法により、主触媒ナノ結晶粒子 (In_{1-x}Ni_xTaO₄)、助触媒ナノ結晶粒子 (NiO_x) を生成する。

まず、生成された触媒ナノ結晶に対して成す評価と目標事項を記す。1)1 次構造としてシングルナノ領域の結晶粒子が形成されている、2)酸素欠損のない組成が実現されている、3)明確な半導体吸収端構造を示し、可視光領域（波長 400 - 600nm）で十分な光吸収がある、などを評価し、主触媒と助触媒の複合ナノ構造型光触媒化に向けた基礎的物性検証

とする。

次に、主触媒ナノ結晶はカリフラワーもしくはファイバー状のポロシティーの高いモフォロジー、助触媒は気相反応性 PLA における 1 次粒子の CCA 現象に起因する自己組織的成長による網目（ウェブ）状の 2 次凝集構造の堆積ができるプロセス条件を構築する。この際、ウェブのサイズ・被覆率を制御できるように試みる。以上のモフォロジー制御の設計指針はすでに保持している領域もあるが、それをさらに進展させる。

この際、異種半導体界面における電子と正孔のポテンシャル障壁の差から、主触媒ナノ結晶は酸化（正孔集合）サイト、助触媒は還元（電子集合）サイトとなり、光励起電子-正孔対の空間的電荷分離が促進されることが期待される。上記の複合ナノ構造光触媒の創製プロセスを構築する。図 1 に模式図を、図 2 に現状の NiO ウェブ状モフォロジーの表面 SEM 観察結果を示す。

(2)ここまで概ね構築した、複合ナノ構造光触媒における主助触媒ナノ結晶粒子の幾何学的配置を、より高精度で制御できるように気相反応性 PLA プロセスの進化を図る。これらのモフォロジー制御は、主に雰囲気反応性ガスの圧力調整により可能であるが、その他にもレーザーパルスエネルギー、照射エネルギー密度、ターゲット/堆積基板間距離などのプロセスパラメータによっても制御されう

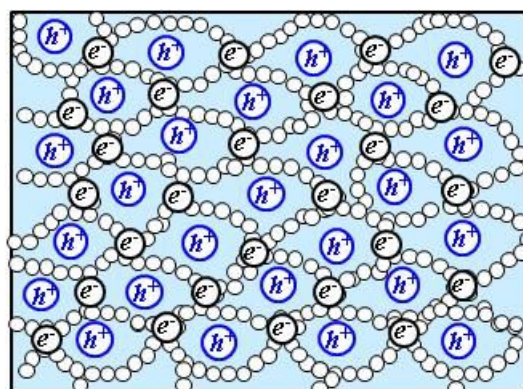


図 1 複合ナノ構造型光触媒の模式上面図。水色領域：主触媒（正孔サイト）、赤色領域：助触媒（電子サイト）。

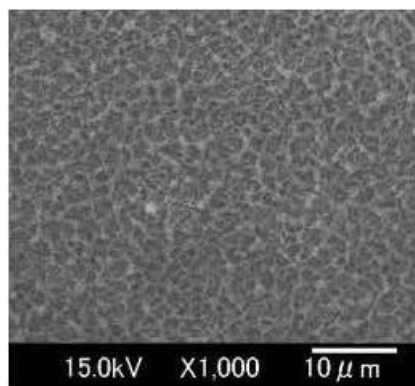


図 2 気相反応性 PLA 法で生成した NiO ナノ結晶の自己組織化網目（ウェブ）状の 2 次凝集構造を観察した表面 SEM 写真。

ることを実証している (Umezu et al., Phys. Rev. B 76, 045328, 2007). 特に助触媒 (NiO_x) については, 1次粒子の CCA 現象により網目 (ウェブ) 状のモフォロジーが形成できるが, その自己組織化過程を解析することで, ウェブのサイズや被覆率を決定する要因に一定の理解が得られるよう推進する. 一般のナノ結晶は表面欠陥密度が高いので, これを介したキャリア再結合が顕著に現れる可能性がある. そこで必要に応じて, 下層主触媒ナノ結晶 ($\text{In}_{1-x}\text{Ni}_x\text{TaO}_4$) に対して, 短時輻射加熱アニール (RTA) を行うことで, 粒子間の焼結を抑制しつつ表面欠陥の回復を行う.

さらに光触媒としての機能検証を実施する. 可視光 (波長 410nm 以上) 誘起により, メチレンブルー溶液の分解を評価する. 複合ナノ構造光触媒の結晶性, 下層主触媒のポロシティ・厚さや上層助触媒のウェブサイズ・被覆率などの 2 種の触媒粒子の幾何学的配置と光触媒機能の関係について精査する.

(3)最終段階は, これまでに得られた結果をもとに, 1)光触媒 1次粒子としての結晶性・光学特性, 2)自己組織化ウェブ状の 2次凝集構造を有す複合ナノ構造の幾何学配置 (下層主触媒のポロシティ・厚さ, 上層助触媒のウェブサイズ・被覆率), と光触媒活性の相関について解析し, 励起キャリアの電荷分離の効率が, 光触媒活性に与える影響について何らかの見解を与える. ここまでに得られた研究成果は, 原著論文をはじめ国内外学術会議をとおして広く公表することで評価を仰ぐ.

4. 研究成果

初 (H25) 年度は代表的主 (光) 触媒である TiO_2 に着目し, 反応性雰囲気ガス中のパルスレーザーアブレーション (PLA) 法における, 網目状 (ウェブ) 構造の自己組織化形成について探索・評価した.

実験方法としては, 雰囲気ガスに酸素を用いて, 67 - 530Pa のガス圧力領域にて, TiO_2 ターゲットの PLA を行った. 堆積させたナノ結晶凝集体構造および物性は, X 線回折 (XRD), SEM, 透過吸収分光測定により評価した.

XRD による結晶構造の評価により, ガス圧力 67, 100, 133Pa の試料はアナターゼ, 266Pa はルチルの結晶構造を示した. SEM での表面構造の観察より 266Pa 以下ではナノ粒子の空間数密度が高く, 266 - 465Pa のガス圧力ではウェブ構造に近い構造が発現している. さらにガス圧力を上げるとウェブ構造に近い構造は発現しなくなる.

透過率から光学密度 (αd) を求め, 光子エネルギー 3.5eV での光学密度 (αd) をグラフにすると, ガス圧力が高くなるにつれ, 光学密度 (αd) が小さくなっている. これは, ガス圧力が高くなるにつれ, ウェブ構造が発現することにより, ナノ粒子の空間数密度が小さくなっていくからだと考えられる. また, バルク TiO_2 は, 間接遷移型半導体であるので,

αd の 1/2 乗とエネルギーの関係よりバンドギャップ (E_g) を見積もると 2.0eV - 2.5eV と文献値よりもかなり小さな値になってしまう. そこで直接遷移型を仮定し, αd の 2 乗とエネルギーの関係から E_g を見積もったところ, 3.2eV - 3.5eV と文献値に近い値となった. これは, バルク TiO_2 は間接遷移型だと言われているが, ナノ結晶化により, 直接遷移型の光吸収が顕著に現れたと考えられる. 直接遷移型としての E_g は, アナターゼ型よりもルチル型の方が小さく, この傾向はバルクの文献値と同様であった.

以上, 初 (H25) 年度の成果をまとめると, 主触媒である TiO_2 ナノ結晶の 2次凝集構造を反応性雰囲気ガスの圧力を調整することで, カリフラワー構造とウェブ構造の自己組織化発現を制御できうることを実証した上, 光吸収による光学密度評価から, ウェブ構造はカリフラワー構造より高いポロシティを有していることが判明した.

中間 (H26) 年度はこれら 2 種の凝集構造について, 堆積膜厚により規格化された紫外光励起の光触媒活性を評価し, ウェブ構造がカリフラワー構造の 3 - 4 倍の値を発揮することを確認した (図 3). これは TiO_2 ナノ結晶 2次凝集体の構造がカリフラワー構造からウェブ構造に変化したことで, 実効的比表面積が増加したものと推察される. またウェブ構造の自己組織化発現の機構に対して, 粗いモデルを考案した.

一方, 薄膜状の TiO_2 ナノ結晶堆積膜表面に金 (Au) ナノ粒子を担持することにより, 可視光励起 (490 - 500nm) においても, メチレンブルー (MB) 溶液の分解を確認した. これは担持 Au ナノ粒子が励起可視光を局在表面プラズモン共鳴により吸収することで, 主触媒 TiO_2 ナノ結晶中に電子 - 正孔対を効果的に生成できたものと考えられる (所謂プラズモニック光触媒動作).

以上, 中間 (H26) 年度の成果をまとめると, 1) TiO_2 ナノ結晶の 2次凝集構造の制御による実効的比表面積の増大によって, 紫外光励起の光触媒活性を向上できること, 2)薄膜状 TiO_2 ナノ結晶に Au ナノ粒子を担持した構

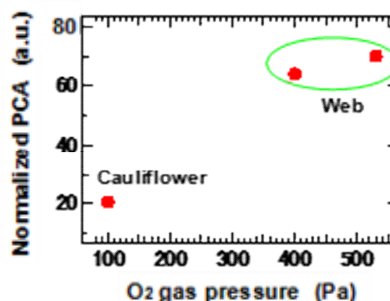


図 3 気相反応性 PLA 法で生成した TiO_2 ナノ結晶の 2次凝集構造が光触媒活性へ及ぼす影響. 自己組織化ウェブ構造はカリフラワ構造の 3 倍以上の活性を示す.

造で、プラズモン動作による可視光励起での光触媒活性を検証し、可視光応答性発現の指針を立てたこと、が挙げられる。

最終(H27)年度はウェブ構造に関して、自己組織化パターン形成の観点からさらに調査・検討し、気相PLA法によるこの構造の発現が、酸化物に多く認められ、金属や半導体の2次凝集構造としては、観測されない。このことから気相で形成され始めた2次凝集体の誘電分極による静電的引力・斥力が関与するモデルを考案した。現時点で粗いモデルであるが今後この仮説に沿って、検証をさらに進める価値はあると思われる。

中間(H26)年度の最終月に確認した、気相PLA法によるTiO₂薄膜にAuナノ粒子を担持した複合ナノ構造に置ける局在表面プラズモン共鳴により増強された可視光応答性は、真空蒸着による質量膜厚4nmのAu(堆積形状は島状構造)を、電気炉によりアニール(300°C, 3.0h)することで、Auをボールアップしたものである。この際の粒径分布は、19±8.3nmであった。最終(H27)年度はAuナノ粒子の担持も気相PLA法を用いることで、堆積後とアニール(300°C, 3.0h)後の粒径分布がそれぞれ、8.2±2.0nm, 18±4.9nmとなった。気相PLA法を用いることでAuナノ粒子径の分散を小さくすることに成功した。このことは、今後の可視光励起下における、担持Auナノ粒子の局在表面プラズモン共鳴吸収による光触媒粒子への電子-正孔対生成増強プロセスの構築において、有益な効果をもたらすと考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 5 件)

T. Yoshida, N. Yagi, R. Nakagou, M. Kondou, A. Sugimura, and I. Umezu, "Structural properties of TiO₂ nanocrystallites condensed in vapor-phase for photocatalyst applications", Appl. Phys. A, vol. 117, pp. 223-227, 2014.

【査読有】

DOI: 10.1007/s00339-014-8378-3

T. Yoshida, T. Watanabe, F. Kikuchi, T. Tabuchi, I. Umezu, and M. Haraguchi, "Pulsed-laser-deposited TiO₂ nanocrystalline films supporting Au nanoparticles for visible-light-operating plasmonic photocatalysts", Appl. Phys. A, vol. 122 (5), pp. 1-5, 2016. 【査読有】

DOI:10.1007/s00339-016-0035-6

I. Umezu, N. Yagi, A. Sugimura and T. Yoshida, "Non-equilibrium growth processes of porous TiO₂ nanocrystal-films during pulsed laser ablation", Proc. of MRS 2012 fall meeting, Materials Research Society, MRSF12-1497-K03-20, 2013. 【査読有】

DOI: <http://dx.doi.org/10.1557/opl.2013.495>

I. Umezu, A. Sugimura and T. Yoshida, "Formation of hierarchical structured TiO₂ nanoparticle aggregates by pulsed laser ablation in background gas", Proc. of Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR), pp. TuE3-4, 2013.

【査読有】

https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?uri=CLEOPR-2013-TuE3_4

梅津郁朗, 吉田岳人, "ガス中パルスレーザアブレーションで作製されたTiO₂ナノ粒子凝集体の階層構造", 電気学会論文誌C(電子・情報・システム部門誌), vol. 135, no. 9, pp. 1055-1059, 2015. 【査読有】

DOI:10.1541/ieejieiss.135.1055

[学会発表](計 11 件)

I. Umezu, A. Sugimura and T. Yoshida, "Formation of hierarchical structured TiO₂ nanoparticle aggregates by pulsed laser ablation in background gas", Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR), Kobe, Japan, 2013.6.

T. Yoshida, A. Sugimura, I. Umezu, "Relationship of photocatalytic activity to crystal structure of TiO₂ nanoparticles synthesized by reactive pulsed laser ablation", 12th International Conference on Laser Ablation (COLA 2013), Ischia, Italy, 2013. 10.

I. Umezu, A. Sugimura and T. Yoshida, "Formation of pattern structured TiO₂ nano-aggregates by pulsed laser ablation in background gas", 12th International Conference on Laser Ablation (COLA 2013), Ischia, Italy, 2013. 10.

T. Yoshida, K. Wakamiya, A. Sugimura and I. Umezu, "TiO₂ nanocrystallites agglomerated in self-organized web-structures synthesized in gas-phase pulsed laser ablation", 9th International Conference on Photo-Excited Process and Applications, Matsue, Japan, 2014. 9.

T. Yoshida, K. Wakamiya, T. Watanabe, T. Aoki, A. Sugimura, and I. Umezu, "Photocatalytic activities of TiO₂ nanocrystallites agglomerated in self-organized web-structures by gas-phase pulsed laser ablation", 7th International Congress on Laser Advanced Materials Processing, Kokura, Japan, 2015.5.

T. Yoshida and I. Umezu, "TiO₂-based nanostructures synthesized by vapor-phase pulsed laser ablation for photocatalytic applications", Energy Materials Nanotechnology (EMN) Meeting, Cancun, Mexico, 2015. 6. 【招待講演】

T. Watanabe, F. Kikuchi, T. Tabuchi, T. Yoshida, I. Umezu, and M. Haraguchi, "TiO₂

PLD nanocrystalline films supporting Au nanoparticles for application to visible-light-operating plasmonic photocatalysts ", 13th International Conference on Laser Ablation (COLA 2015), Cairns, Australia, 2015. 8.

T. Yoshida, I. Umezu, and M. Haraguchi, "Nanostructured TiO₂ by pulsed laser ablation for application to visible-light-operating plasmonic photocatalysts", Energy Materials Nanotechnology (EMN) TiO₂ Meeting, Hawaii, USA, 2016. 3. 【招待講演】

若宮千司, 梅津郁朗, 杉村陽, 吉田岳人, "パルスレーザーアブレーション法により自己組織的に網目構造凝集した TiO₂ ナノ結晶の光吸収特性", 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会, 2013. 9.

若宮千司, 梅津郁朗, 杉村陽, 吉田岳人, "パルスレーザーアブレーションで作製した TiO₂ ナノ結晶凝集体の表面構造と光触媒機能の相関", 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 2014. 9.

菊地史人, 渡辺てい, 田淵武尊, 吉田岳人, 梅津郁朗, 原口雅宜, "金ナノ粒子担持型光触媒の作製技術の確立と特性評価", 2015 年度応用物理学会中国四国支部・若手半導体研究会, 2015.8.

片山慶太, 浜岡克佳, 青木珠緒, 福岡寛, 吉田岳人, 杉村陽, 梅津郁朗, "ダブルパルスレーザーアブレーションによる TiO₂ と Ni のブルーム衝突過程", 第 63 回応用物理学会秋季学術講演会, 2016. 3.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www01.anan-nct.ac.jp/souran/takehito>

6. 研究組織

(1)研究代表者

吉田 岳人 (YOSHIDA TAKEHITO)

阿南工業高等専門学校・創造技術工学科・教授

研究者番号：20370033

(2)研究分担者

梅津 郁朗 (UMEZU IKUROU)

甲南大学・理工学部・教授

研究者番号：30203582