

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26410247

研究課題名(和文) 中空アノード液中プラズマ処理技術の構築と可視光応答型酸化チタン光触媒の開発

研究課題名(英文) Development of in-liquid plasma system with tube-type anode and application to highly photocatalytic active TiO₂ materials

研究代表者

寺島 千晶 (Terashima, Chiaki)

東京理科大学・研究推進機構総合研究院・准教授

研究者番号：00596942

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)：中空アノード液中プラズマ技術を開発し、中空電極に窒素ガスを導入することでプラズマ反応場を拡張した安定な液中プラズマを実現した。本技術によって液中に分散した酸化チタンナノ粒子を処理した結果、ナノ粒子表面のみに酸素欠損を導入した酸化チタンを作製することに成功した。この構造によって光触媒活性が大幅に向上し、蛍光灯下においてもアセトアルデヒドの完全分解が行えることを確認した。その機構についても明らかにした。また、本技術によって窒素と水から植物育成に必要な液体肥料を開発できる指針を見出した。

研究成果の概要(英文)：Here, we report simple and effective synthesis route of transforming weak reactive anatase TiO₂ catalytic crystals into highly energetic, light active TiO₂ by solution plasma processing (SPP). As a result, SPP treated (3 hr) TiO₂ exhibit high photocatalytic performance in acetaldehyde deformation compare to pristine TiO₂ tested under identical condition. Synthesis of highly reactive core-shell structured TiO₂ with oxygen vacancies at room temperature compare to conventional high temperature solid-state process demonstrating SPP is a powerful approach for designing broad range of solar-light driven photocatalytic materials.

研究分野：プラズマ化学

キーワード：液中プラズマ 光触媒 酸化チタン 酸素欠損 アセトアルデヒド分解 窒素固定

1. 研究開始当初の背景

酸化チタン光触媒はすでに実用化されており、より応用範囲を拡大するため、可視光応答型光触媒の研究開発が活発に行われている。橋本らは、精緻な設計指針の基、酸化チタンの価電子帯正孔を利用し、可視光照射でも高い活性を示す光触媒材料の開発に成功した (J. Am. Chem. Soc., 2010, 132, 6898)。従来の窒素などアニオンドープ型酸化チタンでは、アニオン p 軌道由来の準位が価電子帯の上に形成するため、バンドギャップの狭小化による可視光応答が可能となるものの、光励起正孔の酸化力が弱くなり、可視光下での活性が不十分であった。橋本らが見出した、伝導帯を制御した、銅イオンや鉄イオン担持酸化チタンは、窒素ドープ酸化チタンに比べ 10 倍以上高い可視光活性を示し、大きなブレイクスルーとなった。特に、抗菌・抗ウイルス活性にも優れているなど益々の発展が期待できるが、気相での反応を念頭に置いているため、水中、特に酸性溶液などでの金属溶解に課題を残している。そこで、上述の設計指針を踏襲しつつ、毒性がなくありふれた元素のみから構成し、物理的・化学的に安定な光触媒材料の開発が喫緊の課題となっている。一方、酸素欠損型のマグネリ相酸化チタン (Ti_nO_{2n-1} ($n=4-12$)) の組成で表される酸化チタンは、電気伝導性が高く、着色していることから可視光線を吸収する。これだけでは光触媒として機能しないが、ナノサイズの酸化チタン粒子の表層を、このマグネリ相酸化チタンで薄く覆ったコアシェル構造にすると、外殻で効率よく可視光を吸収し、内殻の酸化チタンで光励起した電子と正孔の電荷分離が良好に行われ、酸化チタンをベースとした材料によって非常に高効率な太陽光応答型光触媒が達成できるとの報告があった (Science, 2011, 331, 746)。結晶性酸化チタンを出発原料とし、そのナノサイズを維持しつつ表層のみを還元処理するために、水素の高圧条件 (2 MPa) で 200°C に維持して 5 日間の処理が必要であり、より簡便な手法が求められていた。

2. 研究の目的

本研究は上述の高圧水素還元法に代わるより温和な条件にて酸化チタンナノ粒子の還元処理を達成することを目的とした。液中プラズマ法は、液体の中に配置した二本の電極間にパルス状の高電圧を印加し、水を反応場としたプラズマを発生させることに特徴がある (Pure Appl. Chem., 2008, 80, 2003)。そのため、酸化チタンナノ粒子を懸濁した水溶液を溶媒にすることで、100°C 以下の低温にて、分散状態のままナノ粒子の還元処理が可能となる。本研究では、プラズマ処理能力を従来比で 10 倍以上飛躍的に向上させることを目指し、プラズマ発生電極の一つを中空構造にして、その中を窒素ガスなど

を導入できるように工夫した。

また、このように開発した中空アノード液中プラズマ技術によって処理した酸化チタンナノ粒子の光触媒活性を調査した。可視光応答性等の波長依存性をアセトアルデヒド分解で調査し、得られたアクションスペクトルを解析することで光触媒活性向上の要因調査を行った。

3. 研究の方法

実験の概略図を図 1 に示す。バイポーラパルス電源を用いた。この電源は周期的に正負の電圧を交互に印加することができ、周波数とパルス幅を設定して 1 波形における電圧印加時間を調整することができる。アナターゼ型酸化チタンナノ粒子 (石原産業製, ST-01) を出発原料とした。このナノ粒子 0.4 g を 400 mL の塩化カリウム水溶液に分散させ、冷却器を通して循環させて反応器に導入した。タンゲステン製の中空電極と棒状電極を各々セラミックス管で被覆し、先端のみ露出するように調整した。電極間距離を 0.5 mm にし、中空電極から窒素ガスを流量 200 mL/min で導入した。プラズマ発生条件は、周波数 20 kHz, パルス幅 1 μ s, 電圧 2 kV とした。処理後の試料はろ過したのち回収した。

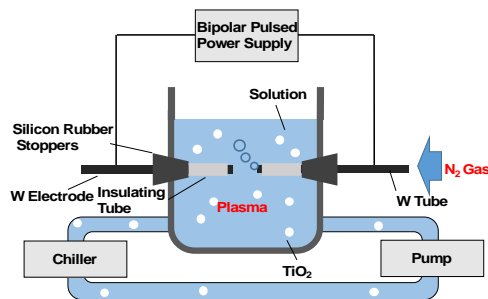


図 1. 窒素ガス導入液中プラズマ装置の概略図

光触媒活性の評価は、アセトアルデヒドの分解実験により行った。光触媒のガス分解試験方法は JIS や ISO で既定されており、中でもタバコの煙成分、シックハウス症候群の原因物質や発がん性物質として知られているアセトアルデヒドをターゲットにした。試験条件は以下のとおりである。液中プラズマ処理時間を変えて作製した酸化チタン試料をそれぞれ 0.1 g 計りとりガラス板に水で塗布して測定試料とした。これを密閉容器に入れ湿度 50% の空気で置換し、紫外線照射を一晩行い、付着している有機物除去を行った。この前処理を行った後、湿度 50% の空気置換をして、濃度が 100 ppm のアセトアルデヒドを暗所で注入した。光を当てない状態でアセトアルデヒドと二酸化炭素の濃度をガスクロマトグラフィで測定した。暗所で 2 時間静置した後、測定試料に蛍光灯 (照度: 8,000 lx) を用いて光を照射し、30 分おきにガスをサンプリングして測定した。

4. 研究成果

(1) 酸化チタン光触媒の高活性化

液中プラズマ処理を行った酸化チタンナノ粒子の評価を行った。従前の棒状電極のみと開発した中空電極を用いた液中プラズマ処理の比較についても検討した。図2に従来系と新規系での液中プラズマ処理前後での光触媒活性比較を示す。図からわかるように緑線で示すように従来系では8時間処理をしたものが最も高活性であったのに対し、青線で示すように新規系では3時間処理をしたものがそれと同等の光触媒活性を示した。このことから、中空電極にして管中に窒素ガスを導入した新規系液中プラズマ処理をすることで、短時間で従来系と同等の光触媒活性を得ることができ、高効率化・高活性化に成功したといえる。

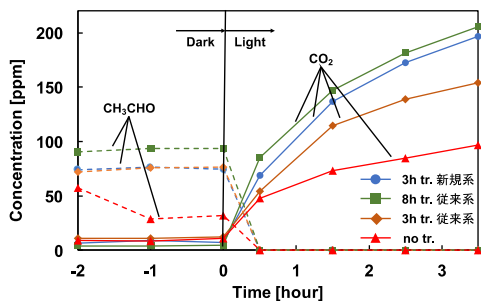


図2. 液中プラズマ処理前後での光触媒活性比較 (破線: CH_3CHO 濃度, 実線: CO_2 濃度)

新規系での高効率化の要因としては、図3に示すように窒素ガス関与時の反応場が大きいためと考えている。これはプラズマの発光スペクトルを見ると、窒素ガス由来のピーク強度の増大から容易に見て取れる。

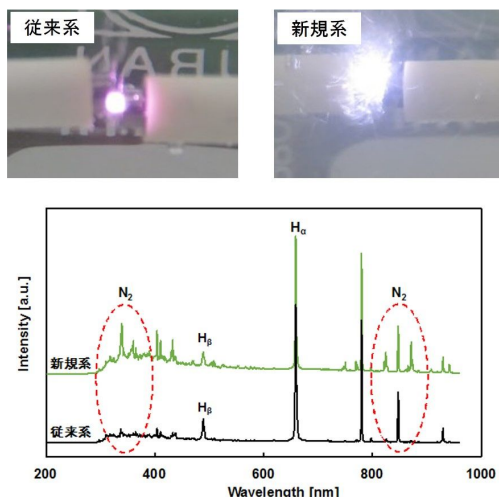


図3. プラズマ発光の様子と発光スペクトル

また、図2の結果は蛍光灯下での応答を調べたものであるが、次に波長依存性の評価も行った。アセトアルデヒド分解に対する光触媒活性を評価するにあたり、照射光の波長を固定し、見かけの量子収率を計算した。この

値は、完全分解した際に発生する二酸化炭素濃度からその生成に要した正孔の数を、光源から照射された光子数で除した値とした。バンドパスフィルターを装着したキセノンランプを用いて、330 nm, 380 nm, 400 nm, 420 nm の波長で実験を行った。結果を図4に示す。可視光である420 nmに反応していなかったのは意外であったが、より驚いたことに330 nmでの見かけの量子収率は2.6倍ほど向上していた。すなわち、液中プラズマ処理をした酸化チタン光触媒は、可視光領域に活性を示したのではなく、蛍光灯の光に僅かに含まれる紫外光に強く反応したことがわかった。このことから液中プラズマ処理によりアナターゼ型酸化チタンのバンドギャップ中に酸素欠損による新しい準位ができることでバンドギャップの狭小化が生じたのではなく、光励起で生成した電子と正孔の再結合が抑制されて光触媒活性が向上したことが示唆された。

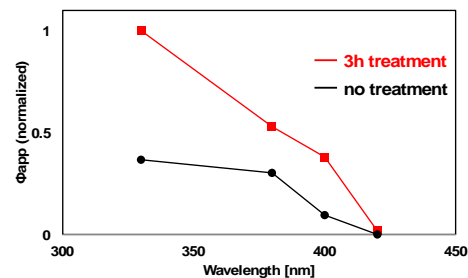


図4. アセトアルデヒド分解に対する光触媒活性のアクションスペクトル

(2) 光触媒活性向上の要因調査

未処理の酸化チタンは白色であるのに対し、液中プラズマ処理をすることで処理時間とともに着色していくことがわかった。光触媒材料の光吸収スペクトル測定は、バンドギャップの大きさや光触媒活性を持つ波長範囲などを類推するうえで非常に重要である。図5は拡散反射スペクトルの測定結果である。未処理の酸化チタンに比べ、吸収端が長波長側にシフトし、可視光域に吸収を持つことを確認した。酸素欠損型の酸化チタンが濃灰色を示すことから、液中プラズマ処理によって酸素欠損の生成が示唆された。

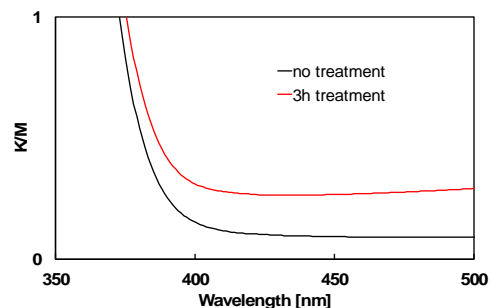


図5. 拡散反射スペクトルの測定結果

また、アナターゼ型酸化チタンとその液中プラズマ処理後の試料をX線回折によって結晶構造の変化を調べたところ、全く変化がないことからアナターゼ型構造を維持していることがわかった。一方、酸素欠損量を評価するために、電子スピン共鳴測定 (ESR) により、 O_2^- 、 F^+ センター (酸素欠損に電子が1つトラップされた状態)、及び Ti^{3+} の定量を行った。測定条件は、光照射のない状態において 20 K にて、磁場 3386 G、磁場掃引幅 200 G、変調を 100 kHz、5 G、そしてマイクロ波 9.48 GHz、4 μ W にて行った。図 6 は測定した ESR 結果である。未処理の酸化チタンには僅かに F^+ センターのシグナルを g 値 2.003 に観測したのに対し、液中プラズマ処理後の酸化チタンはより顕著に、 O_2^- ($g=2.026, 2.009, 2.002$) を観測した。酸素欠損にトラップされた電子が O_2 分子と反応することで O_2^- が生成したと考えている。 O_2^- と F^+ センターのシグナル強度から酸素欠損量を評価することができ、定量結果は、未処理の酸化チタンには F^+ センターが 8.4×10^{13} 、処理後の酸化チタンには O_2^- が 9.5×10^{15} となり、酸素欠損量が大幅に増加していることが明らかとなった。処理後の試料から F^+ センターを観測できなかつたのは、 $g=2.003$ 付近に見られるピークと重なったからである。面白いことに処理後の試料からは Ti^{3+} ($g=1.990, 1.960$) のシグナルを見ることはできなかつた。一般に、酸素欠損を生成すると Ti^{3+} が生成することが知られているが、液中

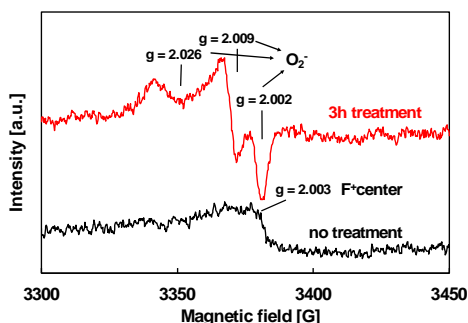


図 6. ESR 測定結果

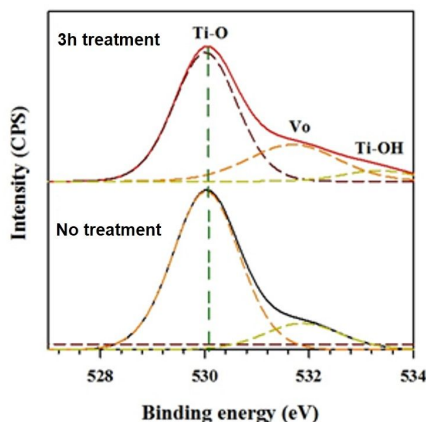


図 7. XPS 測定結果

プラズマ処理をした酸化チタンには観測されなかつた。

さらに、液中プラズマ処理前後の元素組成と化学状態の変化を調べるためにX線光電子分光法 (XPS) による測定を行った。 $Ti2p$ 軌道のピークに変化は見られず、また、ESR 結果と同様に、 Ti^{3+} は生成されず Ti^{4+} を維持していることがわかった。一方、 $O1s$ 軌道を波形分離した結果を図 7 に示す。ここで VO は酸素欠損のピークを表し、明らかなように液中プラズマ処理によって酸素欠損の増加を確認した。また、 $Ti-OH$ のピークは吸着水によるものと考えられ、液中プラズマ処理によって酸化チタン表面が親水化しやすくなっていることもわかった。これらの結果は ESR 測定結果と整合性よく一致していた。

以上の結果をまとめると、液中プラズマ処理後もバルクの構造変化はなくアナターゼ構造を維持していること、そして Ti^{3+} を生成せずに酸素欠損を増加させていることがわかった。このことから酸化チタンナノ粒子を液中プラズマ処理すると、バルクではなくナノ粒子の表面のみに酸素欠損を生成することが示唆された。表面の酸素欠損に存在する不対電子に、酸素の電気陰性度が大きいために吸着しやすくなり、事実、 O_2^- シグナルの増大も確認している。この状態で光励起して生成した励起電子と表面の酸素欠損に吸着した酸素との反応により、活性の高い活性酸素種が生成しやすくなったと考えられる。これら活性酸素種が元となってアセトアルデヒドのような有機物の分解活性が飛躍的に向上したと考えている。また、ナノ粒子表面に酸素欠損ができたことによって、その表面の酸素欠損が光励起電子を捕捉し、励起電子と正孔を局在化して急速な再結合を抑制したことも、光触媒活性向上に大きく関与していると考えている。

(3) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクトおよび今後の展望

ナノ粒子を凝集や焼結させることなく、その表面処理を達成する、低温で高速な反応場を構築することができた。開発に成功した中空アノード液中プラズマ処理技術は、酸化チタンナノ粒子の表面処理に限らず、種々多様なナノ粒子材料の表面処理に適用することが期待できる。また、本研究の主眼としていた、金属助触媒を必要としない高活性な光触媒材料を、酸化チタンをベースに開発することができた。蛍光灯下においても有機物を素早く分解できることを確認し、その要因を突き止めることにも成功した。安価で安定な酸化チタンを用いた、蛍光灯の光でも十分に機能する光触媒材料は、光触媒の室内利用にも大きく貢献し、市場規模を底上げすることが期待できる。今後は、液中プラズマ処理による大量合成への検討と作製した高活性光触媒の気相以外の水中、すなわち水処理材料への応用を検討するとともに、本処理技術によ

る他の材料への適用が高く求められる。下記に述べるように特許との関係から遅れていた論文文化については、以上の結果をまとめ投稿準備を行っている。

(4) 本研究により得られた新たな知見

本研究ではプラズマ反応場の拡張とプラズマ安定性を維持する目的で窒素ガス導入を行った。ところが、窒素ガスを導入した液中プラズマ処理過程において、溶液中に硝酸イオンが生成していることを見出し、プラズマ処理時間と生成量、溶液 pH 変化などを詳細に調査した。その結果、植物育成に必要な肥料の三大栄養素となる、窒素、リン、カリウムを最適な量と pH 範囲で作り出す条件を見出し、大気中の窒素から液体肥料を作り出すことに成功した。実際、この溶液を用いてバジルなど葉物植物の育成を行い、液体肥料として機能することを確認した。本結果をまとめ、2 件の特許出願を行った。本技術は水と空気から有用物質を生み出す新たな技術として高く注目している。

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)

- (1) J. Choi, P. Sudhagar, J.H. Kim, J. Kwon, J. Kim, C. Terashima, A. Fujishima, T. Song, U. Paik, "WO₃/W:BiVO₄/BiVO₄ graded photoabsorber electrode for enhanced photoelectrocatalytic solar light driven water oxidation", Phys. Chem. Chem. Phys., 19, 4648-4655 (2017) 【査読有】 DOI: 10.1039/c6cp08199a
- (2) H. Han, F. Riboni, F. Karlicky, S. Kment, A. Goswami, P. Sudhagar, J. Yoo, L. Wang, O. Tomanec, M. Petr, O. Haderka, C. Terashima, A. Fujishima, P. Schuki, R. Zboril, " α -Fe₂O₃/TiO₂ 3D hierarchical nanostructures for enhanced photoelectrochemical water splitting", Nanoscale, 9, 134-142 (2017) 【査読有】 DOI: 10.1039/c6nr06908h
- (3) 鈴木孝宗, 寺島千晶, 中田一弥, 勝又健一, 藤嶋昭, "液中プラズマ処理による酸化チタンの光触媒活性向上", 会報光触媒, 50, 52-55 (2016) 【査読有】
- (4) 寺島千晶, "酸化チタンの水中プラズマ処理による高光触媒活性", 科学フォーラム, 384, 6-9 (2016) 【査読有】
- (5) 寺島千晶, 中田一弥, 勝又健一, 藤嶋昭, "環境浄化をめざした液中プラズマ技術の利用", 無機マテリアル学会会誌, 22, 420-425 (2015) 【査読有】

[学会発表](計 19 件)

- (1) C. Terashima, "Photocatalytic Activities of TiO₂ Nanoparticles Treated by In-liquid Plasma Processing", International Conference on Small Science, NH Collection Aranzazu, Spain, 2017 年 5 月 12 日
- (2) 鈴木翔貴, 本多楓, 寺島千晶, 鈴木孝宗, 中田一弥, 勝又健一, 近藤剛史, 湯浅真, 藤嶋昭, "中空電極を用いた液中プラズマ処理 TiO₂ の高活性化に関する研究", 日本化学会第 97 春季年会, 慶應義塾大学日吉キャンパス, 2017 年 3 月 17 日
- (3) C. Terashima, "Recent Progress in Photocatalysis International Research Center", International Conference on Advances in Materials Science (ICAMS 2016), Raje Ramrao College, Jath, India, 2016 年 12 月 7 日
- (4) 鈴木翔貴, 本多楓, 寺島千晶, 中田一弥, 勝又健一, 近藤剛史, 湯浅真, 藤嶋昭, "中空電極を用いた液中プラズマ処理による TiO₂ の高活性化と構造解析", 第 4 回メソスコピック研究会, 東京・東京理科大学森戸記念会館, 2016 年 11 月 30 日
- (5) 本多楓, 寺島千晶, 鈴木孝宗, 中田一弥, 勝又健一, 近藤剛史, 湯浅真, 藤嶋昭, "中空アノード液中プラズマによる窒素固定化と植物育成に関する研究", 光触媒国際研究センター&光触媒研究推進拠点平成 27 年度研究成果報告会, 東京理科大学葛飾キャンパス, 2016 年 7 月 9 日
- (6) 本多楓, 寺島千晶, 中田一弥, 勝又健一, 近藤剛史, 湯浅真, 藤嶋昭, "植物育成のための液中プラズマ処理溶液の開発", 日本化学会第 96 春季年会, 同志社大学京田辺キャンパス, 2016 年 3 月 25 日
- (7) 内藤茜, 寺島千晶, 中田一弥, 勝又健一, 近藤剛史, 湯浅真, 藤嶋昭, "Structural Analysis and Photocatalytic Characterization of TiO₂ Treated by Solution Plasma", 日本化学会第 96 春季年会, 同志社大学京田辺キャンパス, 2016 年 3 月 25 日
- (8) K. Honda, C. Terashima, K. Nakata, K. Katsumata, T. Kondo, M. Yuasa, A. Fujishima, "Plant Growth Using of Solution Plasma Treated Water with Nitrogen", Second International Symposium on Advanced Water Science and Technology (ISAWAT-2), Environmental Studies Hall, Nagoya University, 2016 年 2 月 16 日
- (9) K. Honda, C. Terashima, K. Nakata, T. Kondo, M. Yuasa, A. Fujishima, "Ammonia synthesis by liquid plasma processing under nitrogen stream", The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies, Honolulu, Convention Center, 2015 年 12 月 16 日

- (10) 寺島千晶, "水中プラズマ技術の光触媒と植物工場への展開", 第 22 回シンポジウム「光触媒反応の最近の展開」, 千葉・東京理科大学, 2015 年 12 月 4 日
- (11) 内藤茜, 本多楓, 寺島千晶, 中田一弥, 勝又健一, 石田直哉, 北村尚斗, 井出本康, 近藤剛史, 湯浅真, 藤嶋昭, "液中プラズマ処理した高活性酸化チタン光触媒の構造解析", 第 22 回シンポジウム「光触媒反応の最近の展開」, 千葉・東京理科大学, 2015 年 12 月 4 日
- (12) 本多楓, 寺島千晶, 中田一弥, 勝又健一, 近藤剛史, 湯浅真, 藤嶋昭, "液中プラズマによる窒素固定化と植物育成への応用", 第 22 回シンポジウム「光触媒反応の最近の展開」, 千葉・東京理科大学, 2015 年 12 月 4 日
- (13) C. Terashima, K. Honda, A. Naito, K. Nakata, K. Katsumata, N. Ishida, N. Kitamura, Y. Idemoto, T. Kondo, M. Yuasa, A. Fujishima, "Photocatalytic Activities of TiO₂ Nanoparticles Treated by In-liquid Plasma under Nitrogen Stream", The 20th International Conference on Semiconductor Photocatalysis & Solar Energy Conversion, Crowne Plaza, San Diego, CA, 2015 年 11 月 16 日
- (14) C. TERASHIMA, K. HONDA, A. NAITO, K. NAKATA, K. KATSUMATA, T. KONDO, M. YUASA, A. FUJISHIMA, "Enhanced Photocatalytic Properties of TiO₂ Treated by In-liquid Plasma with N₂ Bubbling", SIEMME'21, Xiamen International Conference Center, 2015 年 9 月 12 日
- (15) K. HONDA, A. NAITO, C. TERASHIMA, K. NAKATA, K. KATSUMATA, T. KONDO, M. YUASA, A. FUJISHIMA, "Ammonia Synthesis by Solution Plasma Processing", SIEMME'21, Xiamen International Conference Center, 2015 年 9 月 11 日
- (16) C. TERASHIMA, K. HONDA, A. NAITO, K. NAKATA, K. KATSUMATA, N. ISHIDA, N. KITAMURA, Y. IDEMOTO, T. KONDO, M. YUASA, A. FUJISHIMA, "Photocatalytic activities of nano-sized TiO₂ treated by in-liquid plasma processing", First International Symposium on Recent Progress of Energy and Environmental Photocatalysis, Chiba · Tokyo University of Science, 2015 年 9 月 4 日
- (17) K. HONDA, A. NAITO, C. TERASHIMA, K. NAKATA, K. KATSUMATA, T. KONDO, M. YUASA, A. FUJISHIMA, "Enhanced

- Photocatalytic Activity of TiO₂ Treated by Solution Plasma with N₂ Bubbling", First International Symposium on Recent Progress of Energy and Environmental Photocatalysis, Chiba · Tokyo University of Science, 2015 年 9 月 3 日
- (18) K. Honda, C. Terashima, K. Nakata, T. Kondo, M. Yuasa, A. Fujishima, "Liquid Plasma Treatment under Nitrogen Stream", ISPlasma 2015/IC-PLANTS2015, Nagoya University, 2015 年 3 月 28 日
- (19) 本多楓, 寺島千晶, 中田一弥, 近藤剛史, 湯浅真, 藤嶋昭, "窒素雰囲気下での液中プラズマによる酸化チタンナノ粒子の表面処理と光触媒活性", 光機能材料研究会 第 21 回シンポジウム「光触媒反応の最近の展開」, 東京大学生産技術研究所, 2014 年 12 月 12 日

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 2 件)

名称: プラズマ発生装置, 窒素源製造装置, 養液供給装置, 育成システム, 植物栽培システム, 窒素源を製造する方法及び二酸化炭素を還元する方法

発明者: 寺島千晶, 本多楓, 藤嶋昭, 中田一弥, 勝又健一, 鈴木孝宗, 湯浅真, 近藤剛史

権利者: 東京理科大学

種類: 特許

番号: 特願 2016-123733

出願年月日: 2016 年 6 月 22 日

国内外の別: 国内

名称: アンモニアの製造方法及び化合物製造装置

発明者: 寺島千晶, 本多楓, 藤嶋昭, 中田一弥, 湯浅真, 近藤剛史

権利者: 東京理科大学

種類: 特許

番号: 特願 2015-059333

出願年月日: 2015 年 3 月 23 日

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.rs.tus.ac.jp/pirc/>

<http://www.tus.ac.jp/ridai/doc/ji/RIJIA01Detail.php?act=&kin=ken&diu=673c>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

寺島 千晶 (Chiaki Terashima)

東京理科大学・研究推進機構総合研究院・准教授

研究者番号: 00596942