

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：16101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K03917

研究課題名(和文)熱アシスト大気圧酸素プラズマ処理した酸化チタンナノ粒子の光触媒反応性

研究課題名(英文)Photocatalytic activity of titanium oxide nanoparticles treated by heat-assisted atmospheric pressure oxygen plasma

研究代表者

川上 烈生 (KAWAKAMI, Retsuo)

徳島大学・大学院社会産業理工学研究部(理工学域)・講師

研究者番号：30314842

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：酸化チタンナノ粒子は環境浄化材だけでなく再生可能エネルギー材として期待されているが、光励起キャリアの再結合率が高いため光触媒反応性が低い。我々が提案する熱アシスト大気圧酸素プラズマ処理法は、結晶性に関わらずに、電気炉処理法に比べ紫外光および可視光照射下での光触媒反応性を向上させることを明らかにした。また、光励起電気導電率、X線やフォトルミネッセンス分析から、その光触媒反応性増強機構も明らかにした。主要因は、導入された多くの酸素空孔と吸着酸素により促進される表面でのバンド構造変化、つまりupward band bendingによる電荷分離効果であることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我々が提案する熱アシスト大気圧酸素プラズマ処理法は、結晶性に関わらずに、世界的に知られている電気炉法よりも酸化チタンナノ粒子の紫外光および可視光照射下での光触媒反応性を向上させる今までにない新しい知見である。特にその向上機構において、熱と大気圧酸素プラズマとの相乗効果により導入された多くの酸素空孔と吸着酸素がバンド構造変化に関わり光励起キャリア密度が増加する点が学術的に興味深い。また、高価な真空機器を使わず、熱アシスト大気圧酸素プラズマを生成するため、脱炭素化の観点からも優位性の高い光触媒活性化技術であり、社会的課題である環境保全技術や再生可能エネルギー技術の発展に貢献すると考える。

研究成果の概要(英文)：Titanium oxide nanoparticles are expected to be used not only as an environmental purification material but also as a renewable energy material. Our study clarified that the thermally assisted atmospheric pressure oxygen plasma treatment proposed by the authors greatly improves the photocatalytic activity under ultraviolet irradiation and visible light irradiation as compared to electric furnace treatment, regardless of the crystallinity. In addition, the photoexcited electrical conductivity, X-ray analysis and photoluminescence analysis revealed the mechanism of photocatalytic activity enhancement. The dominant factor found is the charge separation effect due to upward band bending at the surface, which is a band structure change on the surface promoted by large amounts of introduced oxygen vacancies and adsorbed oxygen species.

研究分野：プラズマエレクトロニクス

キーワード：熱アシスト大気圧酸素プラズマ アナターゼ結晶型酸化チタン ルチル結晶型酸化チタン 光触媒ナノ粒子 光分解/光殺菌 酸素空孔 吸着酸素 電荷分離

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。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

アナターゼ型酸化チタンの魅力は、室温下でも光照射だけで強い酸化力が生まれ、脱色や殺菌効果を有することにある。そのため環境浄化材だけでなく、エネルギー問題を背景に人工光合成による水素生成や太陽電池の再生可能エネルギー材として期待されている。アナターゼ型酸化チタンのバンドギャップエネルギー 3.2 eV (波長 388 nm) 以上の光子を吸収することにより電子正孔対が励起され、電子は空気中の酸素を還元しスーパーオキシドアニオン (O_2^-) を、正孔は空気中の水を酸化しヒドロキシルラジカル (OH) を生成する。これら活性酸素種の酸化力が光触媒の反応機構である。しかしながら、電子と正孔の再結合率が高く、光触媒反応性が実用的に低いことが課題である。この反応性を向上させるための研究開発が世界的に行われている。

我々は、光触媒反応性を向上させるポスト処理法として、熱アシスト大気圧酸素プラズマ法を世界で初めて提案した[1]。アナターゼ型酸化チタンナノ粒子 (ST-01, 石原産業) に、熱アシスト大気圧酸素プラズマ処理を施すことにより、光分解力が2倍も向上する。世界的に知られているアニーリング処理によりも分解力が高い。他方、殺菌力の向上は劇的である。ポスト処理をしないと殺菌力はほとんどないが、熱アシスト大気圧酸素プラズマ処理により殺菌力が 10^5 倍も向上する。アニーリング処理に比べてもはるかに殺菌力が高く、実用化レベルに達している。しかしながら、熱アシスト大気圧酸素プラズマ処理を施すことにより光触媒反応性がなぜ向上するのか、その光触媒活性増強機構が明らかになっていない。

2. 研究の目的

- (1) 熱アシスト大気圧酸素プラズマ処理を、アナターゼ型酸化チタンナノ粒子 (ST-01) に施すことにより、劇的に光触媒反応性が向上することを見出したが、その詳細な光触媒活性増強機構は明らかにされていない。熱アシスト大気圧酸素プラズマ処理はアナターゼ型酸化チタンナノ粒子物性に何をもちたらし光励起キャリア密度を向上させるのか、その光触媒活性増強機構を各種 X 線や光・電気分析等から明らかにする。
- (2) 他のアナターゼ型ペーシング酸化チタンナノ粒子、すなわちアナターゼ/ルチル混晶型酸化チタンナノ粒子 (P-25, Degussa) においても、熱アシスト大気圧酸素プラズマ処理効果により、紫外光照射だけでなく可視光照射下でも光分解力と光殺菌力が優位的に向上するのか明らかにする。また、各種 X 線や光・電気分析等からその光触媒活性増強機構も明らかにする。
- (3) バンドギャップエネルギー (3.0 eV , 波長 415 nm) が小さいルチル結晶ペーシング酸化チタンナノ粒子 (Pt-doped rutile TiO_2 , MPT-623, 石原産業) においても、熱アシスト大気圧酸素プラズマ処理効果により、一般照明でもある白色 LED 照射下でも光分解力が優位的に向上するのか明らかにする。
- (4) 細菌やウイルスの感染拡大を抑制する一つの技術として、光触媒ナノ粒子を利用した空気清浄機が注目されている。紫外線照射により活性酸素種が光触媒表面に容易に生成し、細菌やウイルスを壊死させるからである。しかしながら、細菌やウイルスが光触媒表面上に存在しないと殺菌力が機能しないことが課題でもある。LED と光触媒ナノ粒子を用いた非接触殺菌システム装置を開発し、アナターゼ TiO_2 ナノ粒子 (未処理サンプル)、プラズマ支援アニーリング[1]したサンプル、電気炉アニーリングしたサンプルの非接触殺菌効果を明らかにする。

3. 研究の方法

熱アシスト大気圧酸素プラズマ処理は、本研究室で開発したヒーターを装着した誘電体バリア放電プラズマリアクタ装置を使用した。大気圧 (100 kPa) での低温 O_2 プラズマは、2つのステンレス電極間隔 2 mm の放電ギャップ空間で生成された。下部電極はサンプルステージでもあり電的に接地されている。またヒーターにも繋がれている。上部電極は、厚さ 1 mm で直径 50 mm のアルミナで覆われ、 25 kHz の交流電源に接続されている。 O_2 ガス (純度 99.9 vol\%) は、高圧ガスボンベから 15 mL/min のガス流量でリアクタ装置内器に供給される。印加電圧の最大値は 1.5 kV で、放電ギャップに流れる電流の最大値は 100 mA であった。消費電力は約 8 W であった。

サンプルは、約 10 mm 角のガラス基板上に固着化した光触媒ナノ粒子 (ST-01, P-25, MPT-623) である。固着化を行うため、 60 Pa 容量結合型 RF アルゴンプラズマ ($V_{\text{max}} = 200\text{ V}$) でガラス表面を 10 分間処理した。その処理後、光触媒ナノ粒子分散溶液 (100 mL , $2.5 \times 10^3\text{ mass ppm}$) を滴下し、 24 時間自然乾燥させて準備した。

サンプルを置いたサンプルステージを温度 $300\text{ }^\circ\text{C}$ に保ち、大気圧低温酸素プラズマを 1 時間照射した。比較のために温度を変化させて、 1 時間の空気アニール処理も実施した。光触媒反応性の評価には、メチレンブルー色素の光分解脱色実験と枯草菌 (*Bacillus subtilis* ATCC6633 株) の光殺菌実験を実施した。用いた光源は、 365 nm の紫外光 LED, 405 nm の可視光 LED, 白色 LED である。光触媒反応性向上機構の解明には、X 線光電子分光法 (XPS) による試料表面の化学組成や X 線回折法 (XRD) を用いた結晶構造分析、電子顕微鏡 (SEM) と原子力間顕微鏡 (AFM) を使用した表面観察を行った。更に、分光光度計による光吸収量、LCR メーターによる光励起

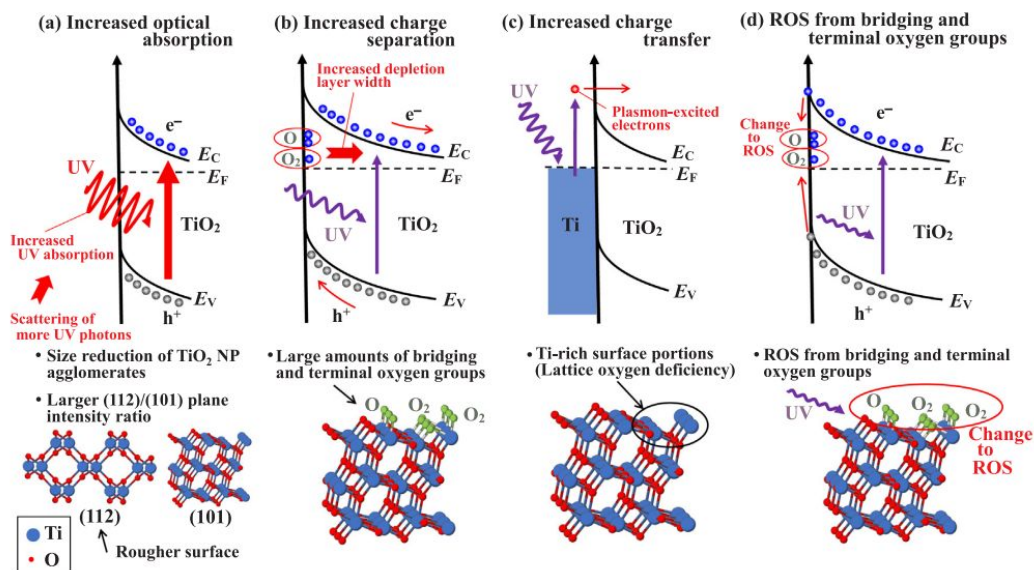


Fig. 1. Proposed photocatalytic activity enhancement of anatase TiO_2 nanoparticles annealed with the assistance of O_2 plasma [1].

電気導電率変化，フォトルミネッセンス法により，プロセス中に導入された表面酸素空孔量を評価した。

365 nm LED 照射で活性化される光触媒ナノ粒子による非接触殺菌システム装置を開発した[2]。光触媒ナノ粒子を担持させたガラスウールを非接触殺菌装置中央部に設置し，外部側面から二つの 365-nm LED を照射させた。紫外線 LED 照射により光触媒ナノ粒子表面上に生成させた活性酸素種を循環器（回転数: 4700 rpm）により放出させた。この活性酸素種を含む気流により殺菌させる機構である。使用した光触媒ナノ粒子サンプル試料は，アナターゼ TiO_2 ナノ粒子（ST-01）である。比較のため，400 °C電気炉アニーリングしたものも用いた。殺菌対象は、10 μL 枯草菌菌液（*Bacillus subtilis* ATCC 6633, 2.0×10^8 CFU/mL）を 0.8% 食塩寒天培地（ $\phi 60$ mm）に滴下したものとした。そのプレート 3 枚を光触媒ナノ粒子から離れた距離に設置し，5 時間のあいだ気流下で運転した。プレートの乾燥を防ぐため，非接触殺菌処理時は加湿器により装置内湿度を 80–95%程度に保った。プレートに残存する生菌数をコロニーカウント法により計数することで，サンプルの殺菌力を比較分析した。

4. 研究成果

- (1) 熱アシスト大気圧酸素プラズマ処理により，電気炉アニーリングに比べ，アナターゼ型酸化チタンナノ粒子（ST-01）の光吸収量，光励起電気導電率，表面吸着酸素量，(112)/(101)面配向強度比が高められた。これらのことから光触媒反応性の向上は，大きな有効面積を持つ（112）面方位の成長と酸化チタンナノ粒子の凝集サイズの微細化により光吸収量が増加したことによる光励起キャリア密度の増加だと考えられる。また，プラズマ誘起酸素空孔により吸着酸素量増加に起因する表面空乏層幅拡大による電荷分離促進効果とプラズモン励起電子の電荷移動効果も関与したと考える。更には，光励起キャリアにより表面吸着酸素から生成される活性酸素種も起因したと考える。まとめると，Fig. 1 のような光触媒活性化増強機構となる[1]。
- (2) アナターゼ/ルチル混晶型酸化チタンナノ粒子（P-25）においても，熱アシスト大気圧酸素プラズマ処理効果により，紫外光（365 nm LED）照射だけでなく可視光（405 nm LED）照射下でも光分解力と光殺菌力が優位的に向上することを見出した（Fig. 2）。熱アシスト大気圧酸素プラズマ処理により，アナターゼ結晶数の増加，酸化チタンナノ粒子の凝集体サイズの縮小化，酸化チタン表面上に吸着した架橋酸素関連基数および末端酸素関連基数の増加，格子酸素欠損数の増加を齎すことが X 線や電子線分析からわかった。光学と電気分析から，紫外光と可視光照射下での光吸収量や光励起電気導電率も増加す

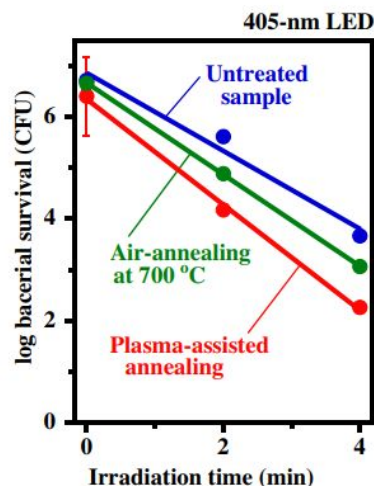


Fig. 2. The log numbers of bacterial survival for untreated, plasma-assisted-annealed, and 700 °C air-annealed P-25 nanoparticles under 405 nm LED irradiation [2].

ることもわかった。

これらの結果から、熱アシスト大気圧酸素プラズマ処理法による光触媒活性化機構は、紫外光と可視光照射下での光励起キャリア濃度の増加が主要因であることがわかる。これらの光励起キャリア濃度増加は、吸着した多くの架橋酸素関連基数および末端酸素関連基数により引き起こされる表面近傍での空乏層幅拡大と upward band bending による電荷分離効果の促進と考える。特に可視光照射下では、この表面近傍でのバンド構造変化に伴うルチル相からアナターゼ相への電荷移動による光励起キャリア濃度の増加も寄与すると考える[3]。

- (3) 白色ドーパしたルチル結晶型酸化チタンナノ粒子 (MPT-623) においても、熱アシスト大気圧酸素プラズマ処理効果により、Fig. 3 のように白色 LED 照射下でも光分解力が優位的に向上することを見出した[4]。電気炉アニリング処理法、大気圧酸素プラズマ処理法、酸素ガスアニリング処理法よりも高い光分解力を示した。しかもルチル結晶ベース型酸化チタンナノ粒子表面の親水性の向上にも寄与した。光励起電気導電率のデータ分析から、熱アシスト大気圧酸素プラズマ処理により増加した光励起キャリア濃度が主要因であることがわかった。電気炉アニリング処理法は酸化チタンナノ粒子の結晶性に依存することを考えると、本処理方法の優位性は高い。
- (4) 熱アシスト大気圧酸素プラズマ処理したアナターゼ結晶型酸化チタンナノ粒子の非接触殺菌力（光触媒から離れた地点での殺菌力）も科学的に明らかにした。Fig. 4 のように電気炉アニリングしたものに比べ約 10 倍もの高い非接触殺菌力を示した [4]。この非接触殺菌力の主要因は、光触媒表面で生成された長寿命の過酸化水素が、微生物が存在する場所まで気流に乗って飛行し到達したことによる酸化力であることも明らかにした。これは酸化チタンナノ粒子の新しい応用を期待させる知見である。

これらの知見は、酸化チタンナノ粒子の光触媒活性化機構の理解と応用において学術的に極めて重要である。熱アシスト大気圧酸素プラズマ処理法は、酸化チタンナノ粒子の光触媒活性増強化および非接触殺菌性に新たな展望をもたらす画期的なポスト処理法であるといえる。

参考文献

- [1] Retsuo Kawakami, Masahito Niibe, Yoshitaka Nakano, Yuma Araki, Yuki Yoshitani, Chisato Azuma, and Takashi Mukai, Characteristics of TiO₂ thin films surfaces treated by O₂ plasma in dielectric barrier discharge with the assistance of external heating, *Vacuum* 152 (2018) 265–271.
- [2] Retsuo Kawakami, Yuki Takao, Akihiro Shirai, and Takashi Mukai, Remote bactericidal effect of anatase TiO₂ photocatalytic nanoparticles annealed with low-temperature O₂ plasma, *Biocontrol Science* 27 (2022) 217–222.
- [3] Retsuo Kawakami, Yuki Yoshitani, Akihiro Shirai, Shin-ichiro Yanagiya, Hirofumi Koide, Yuki Mimoto, Kosuke Kajikawa, Masahito Niibe, Yoshitaka Nakano, Chisato Azuma, and Takashi Mukai, Effects of nonequilibrium atmospheric-pressure O₂ plasma-assisted annealing on anatase TiO₂ nanoparticles, *Applied Surface Science* 526 (2020) 146684:1–12.
- [4] Yuta Makino, Retsuo Kawakami, Shin-ichiro Yanagiya, Masahito Niibe, Yoshitaka Nakano, and Takashi Mukai, Atmospheric-pressure low-temperature O₂ plasma-assisted annealing on visible-light-induced photocatalytic activity of Pt-doped rutile TiO₂ nanoparticles, *Proceedings of International Symposium on Dry Process 2022* (2022) 125–126, ISSN: 978-4-900986-23-7.

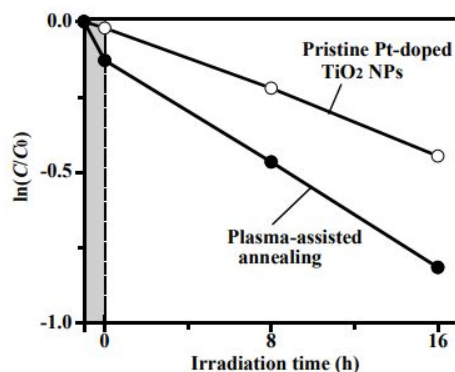


Fig. 3. Comparison between the MB dye photodecomposition values of pristine, plasma-assisted-annealed Pt-doped rutile TiO₂ nanoparticles under white LED irradiation [3].

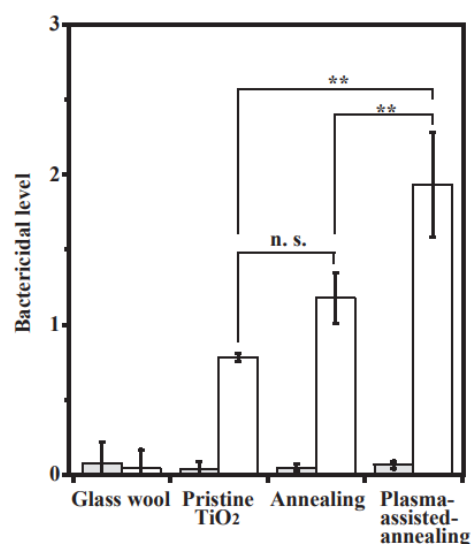


Fig. 4. Remote bactericidal effects of glass wool (without TiO₂ NPs), pristine TiO₂ NPs, air-annealed TiO₂ NPs, and plasma-assisted-annealed TiO₂ NPs in the presence (open bars) and absence (shaded bars) of UV irradiation. The symbol, **, corresponds to a P value < 0.01, as estimated by the Tukey-Kramer test. The abbreviation, n. s., signifies no significant differences, as estimated by the same test.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Retsuo Kawakami, Yuki Takao, Akihiro Shirai, Takashi Mukai	4. 巻 27
2. 論文標題 Remote Bactericidal Effect of Anatase TiO ₂ Photocatalytic Nanoparticles Annealed with Low-Temperature O ₂ Plasma	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Biocontrol Science	6. 最初と最後の頁 217-222
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.4265/bio.27.217	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 Yuta Makino, Retsuo Kawakami, Shin-ichiro Yanagiya, Masahito Niibe, Yoshitaka Nakano, Takashi Mukai	4. 巻 -
2. 論文標題 Atmospheric-Pressure Low-Temperature O ₂ Plasma-Assisted Annealing on Visible-Light-Induced Photocatalytic Activity of Pt-doped Rutile TiO ₂ Nanoparticles	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of International Symposium on Dry Process 2022	6. 最初と最後の頁 125-126
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 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 Retsuo Kawakami, Yuki Mimoto, Shin-ichiro Yanagiya, Akihiro Shirai, Masahito Niibe, Yoshitaka Nakano, Takashi Mukai	4. 巻 218
2. 論文標題 Photocatalytic Activity Enhancement of Anatase/Rutile-Mixed Phase TiO ₂ Nanoparticles Annealed with Low-Temperature O ₂ Plasma	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physica Status Solidi A: Applications and Materials Science	6. 最初と最後の頁 2100536:1-13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/pssa.202100536	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 川上 烈生, 植田 迅, 味元 勇樹, 白井 昭博, 宮脇 克行, 吉田 雅彦	4. 巻 -
2. 論文標題 プラズマ支援熱焼結処理したアナターゼTiO ₂ ナノ粒子の光殺菌と鮮度保持効果	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 LED総合フォーラム2022 in 徳島	6. 最初と最後の頁 133-134
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 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 味元 勇樹, 白井 昭博, 柳谷 伸一郎, 川上 烈生	4. 巻 -
2. 論文標題 プラズマ支援アニーリングしたアナターゼ/ルチル混晶型酸化チタンナノ粒子の光分解と光殺菌効果	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 LED総合フォーラム2022 in 徳島	6. 最初と最後の頁 135-136
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 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 高尾 祐希, 白井 昭博, 味元 勇樹, 粟飯原 睦美, 川上 烈生	4. 巻 -
2. 論文標題 LED照射下でのアナターゼTiO ₂ ナノ粒子の非接触殺菌効果	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 LED総合フォーラム2022 in 徳島	6. 最初と最後の頁 137-138
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 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 植田 迅, 榎本 康, 岡田 宏, 川上 烈生	4. 巻 -
2. 論文標題 UV-LED照射下での光触媒酸化チタンナノ粒子の脱臭効果	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 LED総合フォーラム2022 in 徳島	6. 最初と最後の頁 139-140
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 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 Retsuo Kawakami, Yuki Mimoto, Akihiro Shirai, Shin-ichiro Yanagiya, Masahito Niibe, Yoshitaka Nakano, Takashi Mukai	4. 巻 -
2. 論文標題 Photobactericidal Activity of Anatase Titanium Dioxide Nanoparticles Annealed with the Assistance of Nonequilibrium Atmospheric-Pressure Oxygen Plasma	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of International Symposium on Dry Process 2021	6. 最初と最後の頁 127-128
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 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 Yuki Mimoto, Retsuo Kawakami, Shin-ichiro Yanagiya, Masahito Niibe, Yoshitaka Nakano, Takashi Mukai	4. 巻 -
2. 論文標題 Nonequilibrium Atmospheric-Pressure O ₂ Plasma-Assisted Annealing Effect on Photocatalytic Activity of Anatase/Rutile-Mixed Phase TiO ₂ Nanoparticles	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of International Symposium on Dry Process 2021	6. 最初と最後の頁 131-132
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 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 Retsuo Kawakami, Yuki Yoshitani, Akihiro Shirai, Shin-ichiro Yanagiya, Hirofumi Koide, Yuki Mimoto, Kosuke Kajikawa, Masahito Niibe, Yoshitaka Nakano, Chisato Azuma, Takashi Mukai	4. 巻 526
2. 論文標題 Effects of Nonequilibrium Atmospheric-Pressure O ₂ Plasma-Assisted Annealing on Anatase TiO ₂ Nanoparticles	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Surface Science	6. 最初と最後の頁 146684:1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apsusc.2020.146684	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

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 牧野 祐大, 川上 烈生, 柳谷 伸一郎, 新部 正人, 中野 由崇, 向井 孝志
2. 発表標題 白金ドーピングしたルチル型酸化チタンナノ粒子への大気圧低温酸素プラズマ支援アニーリング効果
3. 学会等名 第83回秋季応用物理学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤原 颯真, 笠井 康平, 味元 勇樹, 菅野 智士, 南 康夫, 川上 烈生, 柳谷 伸一郎
2. 発表標題 金/酸化チタンナノパレット構造の作製と光特性評価
3. 学会等名 2021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 2021年

1. 発表者名 川上 烈生
2. 発表標題 新規光触媒材料の開発と食品鮮度保持への応用と展望
3. 学会等名 日本防菌防黴学会第 48 回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高尾 祐希, 川上 烈生, 白井 昭博, 味元 勇樹, 粟飯原睦美, 向井 孝志
2. 発表標題 アナターゼ型光触媒TiO ₂ ナノ粒子による非接触殺菌効果
3. 学会等名 日本防菌防黴学会第 48 回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 味元 勇樹, 川上 烈生, 白井 昭博, 柳谷 伸一郎, 向井 孝志
2. 発表標題 大気圧低温プラズマ支援熱焼結したアナターゼ/ルチル混晶型TiO ₂ ナノ粒子の殺菌効果
3. 学会等名 日本防菌防黴学会第 48 回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 笠井 康平, 味元 勇樹, 菅野 智士, 柳谷 伸一郎, 南 康夫, 川上 烈生, 古部 昭広
2. 発表標題 金-酸化チタンプラズモニックメタサーフェスの結晶成長と光特性評価
3. 学会等名 第82回秋季応用物理学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 味元 勇樹, 川上 烈生, 新部 正人, 中野 由崇, 向井 孝志
2. 発表標題 アナターゼ/ルチル混晶型TiO ₂ ナノ粒子への熱アシスト大気圧低温O ₂ プラズマ処理効果
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
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川上 烈生, 味元 勇樹, 小出 洋史, 柳谷 伸一郎, 新部 正人, 中野 由崇, 向井 孝志
2. 発表標題 熱アシスト非平衡大気圧O ₂ プラズマ処理したアナターゼ型TiO ₂ ナノ粒子の物性
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 日口 聖規, 小出 洋史, 柳谷 伸一郎, 川上 烈生, 片山 哲郎, 古部 昭広, 太田 薫, 富永 圭介
2. 発表標題 金ナノ構造 - 酸化チタン積層膜のTHz-TDS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 味元 勇樹, 川上 烈生, 柳谷 伸一郎, 新部 正人, 中野 由崇, 向井 孝志
2. 発表標題 大気圧低温O ₂ プラズマ支援熱処理したアナターゼ/ルチル混晶型TiO ₂ ナノ粒子の紫外/可視光触媒活性
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 2020年

1. 発表者名 川上 烈生, 味元 勇樹, 宮脇 克行, 白井 昭博, 吉田 雅彦
2. 発表標題 熱支援プラズマ処理したアナターゼ/ルチル混晶型光触媒TiO2ナノ粒子の光分解と鮮度保持効果
3. 学会等名 LED総合フォーラム2021 in 徳島
4. 発表年 2021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

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