

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：32714

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560807

研究課題名(和文)表面酸素欠陥のオーダー化による単結晶酸化チタン光触媒活性の高効率化

研究課題名(英文) Enhancement of photocatalytic activity of rutile titanium dioxide single crystals by ordering surface oxygen defects

研究代表者

伊熊 泰郎 (Ikuma, Yasuro)

神奈川工科大学・工学部・教授

研究者番号：10159593

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：酸化チタンの光触媒活性は通常、バンド理論で説明される。しかし、光触媒表面の酸素原子などが関与する場合、光触媒の表面状態も重要である。本研究ではルチル型酸化チタン単結晶の表面状態(表面酸素欠陥など)とその光触媒活性の関係について知るため、(1)研磨したままの表面の光触媒活性の面方位依存性、(2)研磨面への各種処理が光触媒活性や濡れ性に及ぼす影響、(3)酸化チタン(001)面の表面構造解析などを行った。その結果、ルチル型酸化チタンでは(001)面が一番高活性であること、加熱処理などで活性が低下すること、これを活性状態へ戻すにはある特定方位に多重溝を導入する必要があることなどを見出した。

研究成果の概要(英文)：Photocatalytic activity of titanium dioxide is normally discussed in terms of band theory. There are, however, other factors that are also important for the photocatalytic activity, especially when surface oxygen is involved in the reaction. In this study we investigated the relation between the surface condition of rutile titanium dioxide single crystals and the photocatalytic activity: (1) Effect of crystallographic orientation of as-received (polished) surface on the photocatalytic activity, (2) Effect of surface treatment on the photocatalytic activity and contact angle, (3) Structural analysis of (001) surface, etc. We find that (001) surface is the most active surface among the low index surfaces of rutile titanium dioxide, that the activity decreases as the surface is heated or treated in HF solution, and that multiple parallel grooves must be introduced in certain direction on the low active surface before the activity is regained.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・無機材料・物性

キーワード：光触媒 有機酸の分解 面方位依存性 表面多重溝 表面X線回折

1. 研究開始当初の背景

酸化チタンの光触媒活性は紫外線により固体表面に生成した電子・正孔ペアが引き起こす酸化還元反応であり、水や有機物を分解する(A. Fujishima, et al., *Sur. Sci. Rep.*, 63 (2008) 515)が、最近の我々の研究結果(投稿中)では、異なる波長の紫外線が酸化チタン粉末に異なる効果を示すことを明らかにした。すなわち、波長が320 nmの紫外線と340 nmの紫外線では同一光触媒を用いても水素発生量が2倍も異なることを見出した。この結果はバンド理論では説明できない。さらに、光触媒反応には酸化チタン表面の酸素原子や水酸基などの付着、生成、移動、脱離が関与しているため表面構造も重要な因子であると考えられる。このことは特定のエネルギーギャップを有するバンド構造における電子・正孔ペア生成のみで光触媒活性を議論することの危険性を示唆している。この光触媒活性に関する過去の文献をまとめると、(1) バルクあるいは表面における酸化チタンのバンド構造(図 1)を基本としてきた(例えば: T. Inoue, et al., *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, 53 (1980) 234)。(2) 添加物を含む酸化チタンでもバンド構造への不純物準位形成で説明されてきた(例えば: S. U. M. Khan, et al., *Science*, 297 (2002) 2243)。(3) 表面構造は結晶の方位にも依存するので、光触媒活性も表面の面指数に依存すると予想される。しかし、このような観点の研究は非常に少ない。(4) 白金を付着することによって、触媒効率が上がるが、使用を繰返すことにより劣化することが問題である。

光触媒表面では紫外線照射によって酸素の吸放出が進行すると予想される。この酸素吸放出は酸化チタン表面の酸素原子や酸素欠陥の状態に強く依存するのは当然である。したがって、酸素の吸放出は表面の面指数に強く依存することが考えられる。この観点から文献を調べると、Wilson & Idriss (*J. Catal.*, 214, 46-52 (2003))は酸化チタン表面上での酢酸の分解反応に方位依存性があることを報告し、Hotsenpiller ら(*J. Phys. Chem. B*, 102, 3216-3226 (1998))はAg⁺Agの反応が酸化チタン表面の面指数に依存することを報告している。Wilson & Idrissは単結晶酸化チタンを用いて実験し、平滑な(001)面よりファセット化した(001)面の方が活性であると報告している。しかし、意図的に酸素欠陥を制御した実験は行っていない。Hotsenpiller らの実験は主に薄膜を用いており、単結晶についてはそのままか、1000°Cで焼成したものを利用しているが、酸素欠陥は制御していない。

単結晶酸化チタン表面の光触媒活性は表面の方位(面指数)だけでなく、表面酸素欠陥の状態にも強く依存すると考えられるが、表

面状態は酸素の吸放出の繰返しで変化し、特に表面酸素欠陥濃度は時間の経過とともに減少すると予想される。これを防ぐため、本研究では表面酸素欠陥をオーダー化し、酸素の吸放出が同一部位で連続的に行われることを考えた。その結果として、活性点濃度を高く維持でき、さらに、酸化チタン光触媒の面指数や酸素欠陥状態と光触媒活性の関係を明らかにすることで、活性の高い表面を設計する指針が得られる。

2. 研究の目的

酸化チタンの光触媒活性は、紫外線照射により表面付近の価電子帯電子が励起され、生成した電子・正孔ペアが隣接する化学物質を分解する現象である。この現象は従来、主にバンド理論で考察され、説明されてきた。しかし、これには酸化チタン表面での酸素原子や水酸基などの付着、生成、移動、脱離が関与し、その結果、表面付近の構造も変化していると予想される。本研究では、単結晶酸化チタンの表面酸素欠陥の活性や濃度を高める目的で表面酸素欠陥のオーダー化をはかり、従来の単結晶酸化チタン表面より高活性な光触媒表面を得ることを目的とした。

3. 研究の方法

表面が(001)面などであるルチル型酸化チタン単結晶を用意し、表面のオリフラに対して各種角度方向に多重溝を導入し、さらに還元雰囲気中で400~1000°Cの高温で焼成する。表面X線回折などにより酸素欠陥のオーダー化を確認し、このような各種酸化チタン単結晶にリノール酸を塗布して波長の異なる2種類の紫外線を0~24 h照射し、リノール酸の分解による質量の時間変化を測定する。これらの結果から、表面や多重溝の方位あるいは焼成条件と光触媒活性の関係を得、高光触媒活性を達成する条件を見出す。また、光触媒活性の波長依存性の存在を明らかにする。最後に、このような表面酸素欠陥がオーダー化した単結晶を長期使用できる作製条件を探索する。さらに、最も活性が高い試料の表面構造をSPring-8の表面X線回折、LEED測定で評価する。

4. 研究成果

本研究では、ルチル型単結晶酸化チタンの表面状態(表面酸素欠陥を含む)とその光触媒活性の関係についての知見を得るため、(1)研磨したままの表面(as-received 表面)の光触媒活性の面方位依存性、有機酸の分解のされ方、紫外線(UV)波長への依存性、(2)研磨面への各種処理がその光触媒活性に及ぼす影響あるいは濡れ性の変化、(3)ルチル型単結晶酸化チタンの中で光触媒活性が高い(001)面の表面構造解析、を行った。以下にこれらの結果の概要を述べる。

(1) 最初に、研磨したままの表面 (as-received 表面)の研究では、ルチル型単結晶酸化チタン(001), (100), (101), (114)面にリノール酸(有機酸の一つ)を塗布しUV光を照射したときの質量の時間変化を測定した。さらに比較のため、ガラス板(光触媒活性なし)を用いた同様の実験も行った。その結果、(114)面や(100)面ではリノール酸の質量は約 800 分の間ほとんど不変か、約 3%減少したが、(101)面では 5%、(001)面では 14%減少した。この変化の前後でリノール酸を FT-IR で分析したところ、C=C 二重結合などが減少していた。つまり、リノール酸が分解して気体となり、質量が減少したと考えた。ちなみに、ガラス板上のリノール酸は多少、質量が増加する傾向にあった。これは通常の有機酸の酸化反応(酸素が結合)が進行したものと考えられた。

酸化チタンの表面エネルギーは(110)面で低く、(001)面で高いこと、後に述べる表面構造解析結果を合わせて考えると、酸素が関与する光触媒反応では表面の安定性と光触媒活性に関連性があることが明らかとなった。

この酸化チタンの光触媒作用によるリノール酸の質量減少が C=C 二重結合での分子の切断と関係があるかを調べるため、同一炭素数であるが、二重結合数が異なるオレイン酸(C=C 二重結合が 1 つ)、リノール酸(C=C 二重結合が 2 つ)、リノレン酸(C=C 二重結合が 3 つ)をルチル型酸化チタン(001)面に塗布して UV 照射したところ、オレイン酸<リノール酸<リノレン酸の順に質量減少が大きくなった。つまり、間接的ではあるが、二重結合が切断されている可能性を支持した。また、同じ UV 光でも 366 nm にピークがある UV 光より、312 nm にピークがある UV 光の方が有機酸の分解が速いことも示した。

(2) 研磨面への各種処理と光触媒活性の関係の研究では、単結晶酸化チタン表面に各種の処理を行った後、リノール酸を塗布して UV 照射による光触媒活性をリノール酸の質量減少で評価した。上記(1)の研究で光触媒活性が少なかった(001)面や、他の面として(111)面や(101)面をそのまま利用するあるいは、オリフラに対して平行、垂直、あるいは 45°の方向に多重溝を導入(研磨機を用いて)した。その光触媒活性をリノール酸の分解による質量減少で調べた。その結果、全ての場合でリノール酸の質量はほとんど減少しなかった。つまり、光触媒活性がないし、多重溝によって活性が高まることはなかった。

上記(1)の研究で一番光触媒活性が高かったルチル型単結晶酸化チタン(001)面を HF 処理(5% HF に 10 分間浸漬)したものや、410°C に約 30 分加熱処理した面を作製し、光触媒活性を調べたが、ここでも質量減少はほとんどなく、活性が失われた。加熱処理して活性

が失われた(001)面にさらに多重溝を研磨紙で導入した。オリフラに対して 45°の方向([100]方向)とオリフラに平行な方向([1-10]方向)では活性はないままであったが、オリフラに垂直な方向([110]方向)に導入した場合には光触媒活性が研磨したままの面の約 50%回復した。これは表面酸素欠陥(あるいは表面酸素)の配列が適切な配列になったからと考えられる。

先の研究では多重溝を研磨紙で導入したが、この方法では多重溝の深さや溝の間隔を制御するのが困難である。これらを制御する方法として、リソグラフィーの方法で多重溝を導入してみた。その結果、溝の深さや間隔はきれいに制御できた。この様にして作製した多重溝付与(001)面の光触媒活性を調べたが、オリフラに垂直な方向([110]方向)に多重溝を導入した時だけ光触媒活性が回復した。つまり、光触媒活性を高める機構は多重溝の導入方法に依存しないようである。

ちなみに、これらの各種面の濡れ性を測定したが、as-received (001)面、(101)面や(111)面の間で接触角の差は小さく、(001)面を加熱することによる接触角の減少(濡れ性の増加)の方が大きい。濡れ性が良い方が光触媒活性が高くなると予測できるので、(001)面の加熱による光触媒活性の低下は濡れ性の変化によるものではない。

(3) 以上の結果から、酸化チタンの光触媒活性(酸素が関与する場合)に表面状態(特に酸素の並び)が大きく関与していることは明らかである。そこで、表面 X 線回折(SXRD)でこれらの表面構造を調べた。研磨したままの(001)表面に電子線を照射したところ、LEED パターンが現れず、SXRD 測定は出来なかった。一方、HF 処理した(001)面や加熱処理した(001)面ではきれいな LEED パターンが得られ、SXRD で測定した。この SXRD の測定結果(CTR)の解析は複雑で、まだ解析が完了していないが、現段階では次のとおりである。

研磨したままの(001)面では表面原子が秩序化しておらず、SXRD で測定出来ない。しかし、HF 処理すると(001)面の表面原子は良く秩序化し、その SXRD 結果(CTR)から(101)ファセットが約 4 層の深さまで生じていることが明らかとなった。一方、400°C に加熱した(001)面は HF 処理した面より少し秩序化は悪いが、SXRD で測定できた。それを解析した結果、やはり(101)ファセットが生じているが、表面から 2 層目のところに段が生じている可能性が高い。

ここまで述べた、(1)、(2)、(3)の結果をまとめると、ルチル型単結晶酸化チタン(001)面は研磨したままの面で表面エネルギーが高く、光触媒活性がある。この面は SXRD で測定出来ない。しかし、HF 処理や加熱処理すると、表面は安定な状態へ変化し、SXRD で測定できる。この面は(101)ファセットを作

る。これらの処理面には光触媒活性がほとんどない。この活性なしの HF 処理面に[110]方向の多重溝を導入すると、光触媒活性が約 50 %回復した。これは表面酸素がある一定方向にオーダー化するためである。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 11 件)

宮内裕子、福島広章、S. Anandan、丹羽紘二、伊熊泰郎、"メソポーラス酸化チタンの合成と評価 分析電子顕微鏡システム利用研究成果、その XXI (1)、" 神奈川工科大学研究報告 B, 35, 23-25 (2011).

Y. Ikuma, H. Tajiri, K. Ishiguro, S. Anandana, K. Niwa, O. Sakata, and K. Nakata, "Preparation of ordered 1x1 surface of rutile TiO₂ (001) for surface x-ray diffraction study," Trans. Mat. Res. Soc. Japan, 36 [3] 535-539 (2011).

S. Anandan, Y. Ikuma, and V. Murugesan, "Highly Active Rare-Earth-Metal La-Doped Photocatalysts: Fabrication, Characterization, and Their Photocatalytic Activity," Int. J. Photoenergy, 2012, Article ID 921412, 10 pages (2012).

K. Niwa, K. Tamura, S. Anandan and Y. Ikuma, "Hydrogen production using mesoporous titanium dioxide," Adv. Appl. Ceram., 111, [1-2] 34-38 (2012).

K. Niwa, R. Kuramoto, S. Anandan, and Y. Ikuma, "Zeta potential and hydrogen production of mesoporous titanium oxide," Procedia Engineering, 36, 62-67 (2012).

菊池勝志、丹羽紘二、伊熊泰郎、石黒教矢、"ルチル型酸化チタン単結晶のラマン分光の方位依存性 分析電子顕微鏡システム利用研究成果、その XXII (3)、" 神奈川工科大学研究報告 B, 36, 53-56 (2012).

Y. Ikuma, S. Kida, R. Kuramoto, K. Niwa, and S. Anandan, "Photocatalytic activity of mesoporous titanium dioxide nanoparticles under visible light irradiation," TechConnect WORLD 2012 Proceedings Vol. 1, Advanced Materials (NSTI-Nanotech 2012), 409-412 (2012).

Y. Ikuma, S. Ogoe, Y. Watanabe, K. Niwa, and S. Anandan, "Relationship between the photocatalytic activity and crystallographic orientation of rutile TiO₂ single crystals" J. Ceram. Soc. Japan, 121 [2] 254-257 (2013).

S. Ogoe, Y. Watanabe, K. Niwa, and Y. Ikuma, "Relation between surface orientation and photocatalytic activity of rutile TiO₂ single crystal," Trans. Mat. Res. Soc. Japan, 38 [4] 687-690 (2013).

S. Anandan, T. N. Rao, R. Gopalan, Y. Ikuma, "Fabrication of Visible-Light-Driven N-Doped Ordered

Mesoporous TiO₂ Photocatalysts and Their Photocatalytic Applications," J. Nanoscience and Nanotechnology, 14 [4] 3181-3186 (2014).

Y. Ikuma, S. Ogoe, S. Nakamura, K. Niwa, S. Anandan, H. Tajiri, and O. Sakata, "Effect of multiple parallel grooves on the photocatalytic activity of rutile TiO₂ surfaces," Key Engineering Materials, accepted for publication, March 28, 2014

[学会発表](計 37 件)

Y. Ikuma, Y. Miyuchi, S. Anandan, and K. Niwa, "Decomposition of methylene blue by photocatalytic activity of crystalline mesoporous TiO₂," 18th International Conference on Solid State Ionics (SSI-18), Warsaw, Poland (July 7, 2011).

K. Niwa, R. Kuramoto, S. Anandan and Y. Ikuma, "Zeta Potential and Hydrogen Production of Mesoporous Titanium Oxide," IUMRS-ICA 2011, Taipei, Taiwan (September 20, 2011)

大峠聖也、丹羽紘二、伊熊泰郎、田尻寛男、坂田修身、"ルチル型酸化チタン単結晶の光触媒活性と面指数の関係、" 第 27 回日本セラミックス協会関東支部研究発表会(千葉大学けやき会館) (2011.9.29).

木田周平、蔵元理恵、丹羽紘二、伊熊泰郎、"メソポーラス酸化チタンの合成・評価、" 第 27 回日本セラミックス協会関東支部研究発表会(千葉大学けやき会館) (2011.9.30).

渡邊陽介、大峠聖也、丹羽紘二、伊熊泰郎、"UV 照射を用いた有機物分解による TiO₂ 光触媒活性評価、" 第 27 回日本セラミックス協会関東支部研究発表会(千葉大学けやき会館) (2011.9.30).

木田周平、蔵元理恵、S. Anandan、丹羽紘二、伊熊泰郎、"メソポーラス酸化チタンの合成及び評価、" 第 6 回セラミックフェスタ in 神奈川(湘南工科大学) (2011.12.3).

渡邊陽介、大峠聖也、丹羽紘二、伊熊泰郎、"UV 照射を用いた有機物分解による TiO₂ 光触媒活性評価、" 第 6 回セラミックフェスタ in 神奈川(湘南工科大学) (2011.12.3).

大峠聖也、丹羽紘二、伊熊泰郎、田尻寛男、坂田修身、"ルチル型酸化チタン単結晶の光触媒活性と面指数の関係、" 第 6 回セラミックフェスタ in 神奈川(湘南工科大学) (2011.12.3).

Rami AL Jodaibi, K. Niwa, Y. Ikuma, "Photocatalytic Properties of Periodic (C, N)-Codoped Titanium Oxide Nanostructure," 第 6 回セラミックフェスタ in 神奈川(湘南工科大学) (2011.12.3).

Y. Ikuma, K. Niwa, S. Anandan, K. Ishiguro, S. Ogoe, H. Tajiri, O. Sakata, "Rutile TiO₂ (001) surface studied by surface x-ray diffraction," The 21th Academic Symposium of Materials Research

Society of Japan, 横浜市開港記念会館他 (2011.12.19).

Y. Ikuma, S. Kida, R. Kuramoto, K. Niwa, and S. Anandan, "Photocatalytic activity of mesoporous titanium dioxide nanoparticles under visible light irradiation," TechConnect WORLD 2012, Santa Clara, California (June 19, 2012).

伊熊泰郎、渡邊陽介、大峠聖也、丹羽紘一、"有機物分解による TiO₂ 単結晶の光触媒活性評価、" 第 2 回産学情報交換会 (神奈川工科大学) (2012.8.3).

大峠聖也、丹羽紘一、伊熊泰郎、田尻寛男、坂田修身、"ルチル型酸化チタン単結晶(001)面の表面構造の解析、" 第 28 回日本セラミックス協会関東支部研究発表会 (静岡大学) (2012.8.8).

中村咲也香、渡邊陽介、大峠聖也、丹羽紘一、伊熊泰郎、"ルチル型酸化チタン単結晶の光触媒活性の面方位依存性、" 第 28 回日本セラミックス協会関東支部研究発表会 (静岡大学) (2012.8.9).

高野修平、木田周平、丹羽紘一、伊熊泰郎、"窒素添加メソポーラス酸化チタンの合成および可視光応答性、" 第 28 回日本セラミックス協会関東支部研究発表会 (静岡大学) (2012.8.9).

S. Ogoe, Y. Watanabe, K. Niwa, Y. Ikuma, "Relation between surface orientation and photocatalytic activity of the rutile TiO₂ single crystal," IUMRS-ICEM 2012, Pacifico Yokohama, Yokohama (2012.9.26).

Y. Ikuma, S. Ogoe, K. Niwa, S. Anandan, H. Tajiri, O. Sakata, "Surface X-ray diffraction study of rutile TiO₂ (001)," IUMRS-ICEM 2012, Pacifico Yokohama, Yokohama (2012.9.26).

Y. Ikuma, S. Ogoe, Y. Watanabe, K. Niwa, S. Anandan, H. Tajiri, O. Sakata, "Effect of surface orientation and roughness on photocatalytic activity of rutile TiO₂ single crystal," 62nd Canadian Chemical Engineering Conference, Vancouver, Canada (2012.10.15).

中村咲也香、渡邊陽介、大峠聖也、丹羽紘一、伊熊泰郎、"一方向性多重溝によるルチル型 TiO₂(100)面の光触媒活性の変化、" 第 7 回セラミックフェスタ in 神奈川 (横浜国立大学) (2012.12.15).

大峠聖也、丹羽紘一、伊熊泰郎、(高輝度光科学研究センター)田尻寛男、坂田修身、"ルチル型酸化チタン単結晶(001)面の構造解析とその光触媒活性、" 第 7 回セラミックフェスタ in 神奈川 (横浜国立大学) (2012.12.15).

②④Y. Ikuma, S. Ogoe, Y. Watanabe, K. Niwa, S. Anandan, H. Tajiri, and O. Sakata, "Surface x-ray diffraction study of photocatalytically active rutile TiO₂ (001) single crystal," Advanced Research

Workshop "Oxide Semiconductors for Solar Energy Conversion," UWS, Campbelltown, Sydney, Australia (2013.3.18) (招待講演)

②⑤Y. Ikuma, S. Ogoe, Y. Watanabe, K. Niwa, S. Anandan, H. Tajiri, O. Sakata, "Photocatalytic activity of rutile TiO₂ single crystal at various surface conditions," The 19th International Conference on Solid State Ionics (SSI-19), Kyoto, Japan (June 4, 2013).

②③小菅陽介、渡邊陽介、丹羽紘一、伊熊泰郎、"酸化チタン光触媒による脂肪酸類の分解、" 第 29 回日本セラミックス協会関東支部研究発表会 (埼玉大学) (2013.9.11).

②④伊藤友貴、宮内裕子、丹羽紘一、伊熊泰郎、"KIT-6 から合成したメソポーラス酸化チタンによるメチレンブルー分解、" 第 29 回日本セラミックス協会関東支部研究発表会 (埼玉大学) (2013.9.11).

②⑤山内英二、大峠聖也、丹羽紘一、伊熊泰郎、"多重溝を付与したルチル型 TiO₂(001)面の光触媒活性、" 第 29 回日本セラミックス協会関東支部研究発表会 (埼玉大学) (2013.9.11).

②⑥新井翔太、中村咲也香、大峠聖也、丹羽紘一、伊熊泰郎、"ルチル型 TiO₂(100)面などの光触媒活性と表面状態の関係、" 第 29 回日本セラミックス協会関東支部研究発表会 (埼玉大学) (2013.9.11).

②⑦篠川寛、田村浩一、丹羽紘一、伊熊泰郎、"SBA-15 から合成したメソポーラス酸化チタンによる水素発生、" 第 29 回日本セラミックス協会関東支部研究発表会 (埼玉大学) (2013.9.11).

②⑧黒田大生、大峠聖也、丹羽紘一、伊熊泰郎、"ルチル型酸化チタン(001)面の表面 X 線回折による構造解析、" 第 29 回日本セラミックス協会関東支部研究発表会 (埼玉大学) (2013.9.11).

②⑨Y. Ikuma, S. Ogoe, S. Nakamura, K. Niwa, S. Anandan, H. Tajiri, and O. Sakata, "Relationship between structure and photocatalytic activity of rutile TiO₂ (001) surface," International Symposium on Inorganic and Environmental Materials 2013 (ISIEM 2013), Rennes, France (2013.10.31).

②⑩新井翔太、渡邊陽介、中村咲也香、大峠聖也、丹羽紘一、伊熊泰郎、"光触媒活性に及ぼすルチル型 TiO₂ の表面修飾の効果、" 23rd Annual Meeting of MRS-Japan 2013, Yokohama (2013.12.10).

②⑪黒田大生、大峠聖也、丹羽紘一、伊熊泰郎、田尻寛男、坂田修身、"表面 X 線回折結果から推定されるルチル型酸化チタン(001)面の構造、" 23rd Annual Meeting of MRS-Japan 2013, Yokohama (2013.12.10).

②⑫新井翔太、大峠聖也、丹羽紘一、伊熊泰郎、"ルチル型酸化チタン単結晶への一方向性多重溝付与方法と光触媒活性の関係、" 第 8

回 セラミックフェスタ in 神奈川 (神奈川工科大学) (2013.12.14).

③③小菅陽介、中村咲也香、渡邊陽介、丹羽紘二、伊熊泰郎、”酸化チタン単結晶光触媒活性による脂肪酸類の分解、” 第8回 セラミックフェスタ in 神奈川 (神奈川工科大学) (2013.12.14).

③④黒田大生、大峠聖也、丹羽紘一、伊熊泰郎、”加熱処理したルチル型酸化チタン(001)面の表面構造解析、” 第8回 セラミックフェスタ in 神奈川 (神奈川工科大学) (2013.12.14).

③⑤山内英二、大峠聖也、丹羽紘一、伊熊泰郎、”HF 処理したルチル型酸化チタン(001)面の表面 X 線回折結果の解析、” 第8回 セラミックフェスタ in 神奈川 (神奈川工科大学) (2013.12.14).

③⑥篠川寛、宮内裕子、丹羽紘一、伊熊泰郎、”シリコンテンプレート法を用いて合成した酸化チタンの評価、” 第8回 セラミックフェスタ in 神奈川 (神奈川工科大学) (2013.12.14).

③⑦伊熊泰郎、大峠聖也、渡邊陽介、中村咲也香、丹羽紘二、”ルチル型酸化チタン単結晶の光触媒活性に及ぼす表面多重溝の影響、” 日本セラミックス協会 2014 年年会 (慶應義塾大学日吉キャンパス) (2014.3.19).

〔その他〕

解説など(計3件)

伊熊泰郎、”いまさら聞けない、こんなこと 第16回、Q30: 高温で物質の移動はなぜ起こるのか?、” 耐火物, 63 [3] 154-155 (2011).

伊熊泰郎、”いまさら聞けない、こんなこと 第35回、Q63: なぜ焼結が進行するのか、” 耐火物, 65 [2] 99-100 (2013).

伊熊泰郎、”いまさら聞けない、こんなこと 第44回、Q73: スピノーダル分解とは何か、耐火物でも起こるのか、” 耐火物, 66 [1] 54-56 (2014).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊熊 泰郎 (IKUMA, Yasuro)
神奈川工科大学・工学部・教授
研究者番号: 10159593

(2) 連携研究者

丹羽 紘一 (NIWA, Koichi)
神奈川大学・工学部・非常勤講師
研究者番号: 80468892