

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23350065

研究課題名(和文)水溶液中の酸化チタン単結晶表面における光生成ホール消費プロセスの表面構造依存性

研究課題名(英文)Surface Local Structure Dependence of Consumption Process of Photogenerated Holes on TiO<sub>2</sub> Single Crystal Electrode in Aqueous Solution

研究代表者

今西 哲士(Imanishi, Akihito)

大阪大学・基礎工学研究科・准教授

研究者番号：60304036

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,000,000円、(間接経費) 4,500,000円

研究成果の概要(和文)：Step-terrace 構造を正確に制御したルチル型TiO<sub>2</sub> 単結晶基板を用い、水溶液中で紫外線照射、電位印可下で競争的に起きる 発光、ラフニング、酸素発生、無輻射失活の4つの反応が起きる表面サイトと、反応同士の相関関係を明らかにした。さらに、ラフニング反応が進行するに伴い、4つの反応のホール消費割合が変化することを明らかにした。これは、表面局所構造変化により、活性化エネルギーの低い新しい表面サイトが現れることによるものである。また、pHによって、酸素発生プロセスが大きく変化することを示し、アルカリ下ではホール消費過程が表面局所構造の影響を受けにくいことを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We investigated the surface local structure dependence of four competitive reactions (oxygen evolution reaction, photoluminescence (PL), surface roughening and non-radiative recombination) on TiO<sub>2</sub> surface using atomically flat TiO<sub>2</sub> (rutile) single crystal electrode whose step-terrace structure was strictly controlled. It was revealed that the ratio of the quantum efficiency of four kinds of reactions strongly depends on the surface local structure such as step-terrace structure. On the other hand, it was revealed that the surface roughening process induced the change in the ratio of quantum efficiency of four kinds of competitive reactions, leading to the increase of the photocatalytic activity for oxygen photoevolution due to the generation of new surface sites where the activation energy for O<sub>2</sub> evolution was relatively small.

研究分野：化学

科研費の分科・細目：複合化学・機能物質化学

キーワード：光触媒 水分解 酸化チタン メカニズム 単結晶 電気化学

### 1. 研究開始当初の背景

金属酸化物材料などの光触媒を用いた水の光分解反応に関する研究は、人類が直面しているエネルギー問題の解決の糸口となり得、非常に重要である。しかし、それらの応用研究が進む一方で、その原子レベルでの表面反応メカニズムは、まだまだ不明な点が多かった。我々の研究グループでは、ルチル型のTiO<sub>2</sub>単結晶板を用いて、アノード電位下、水溶液中でおこる水の光酸化反応メカニズム解明の研究を進め、世界で始めて新しい反応機構を提唱した。このモデルは、これまでの電子移動型反応モデル(表面水酸基にホールがトラップされるモデル)では説明出来なかった様々な事象、特に表面局所構造の違いがホール消費過程に与える影響を説明出来る可能性を持っていた。

一方、TiO<sub>2</sub> 微粒子の光触媒反応活性は、ルチルやアナターゼといった結晶系の種類だけでなく、同じ結晶型同士でもその微粒子形状に大きく依存することが古くから知られている。しかし、この問題に対してはまだ明快な答えは出ていない。表面に出ている結晶面やその配置が異なるためであるという指摘は聞かれることがあるが、光触媒の場合、上記したような複数の反応機構が複雑に絡み合うために、その解析は容易ではない。本研究では、原子レベルで基板構造と4つの競争反応との関連性を明らかにすることを目的とするが、これは、微粒子光触媒でも問題となっている光活性の“かたち”依存性の問題にも大きな貢献をすることは間違いない。

そこで、我々は、水の光分解反応を含めた4つのホール消費過程(水分解、表面ラフニング、発光、無輻射失活)が、表面構造とどのような関連性を持つのかに焦点をあてることによって、光触媒反応メカニズム全体を包括的に理解することをめざし、研究をスタートさせた。

### 2. 研究の目的

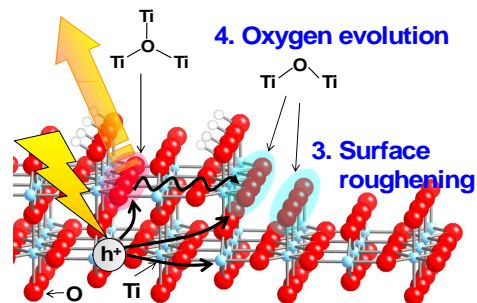
本研究では、紫外線照射下、水溶液中のTiO<sub>2</sub> 表面上でおこる4つの競争的光生成ホール消費反応、酸素発生反応、TiO<sub>2</sub> 表面エッチング反応、発光現象、無輻射失活の比が結晶面および step, terrace などを含む表面構造変化によってどのように変化するかを調べ、1. 表面上でのそれぞれの反応がどのような表面サイトで起きているのか、2. それらがお互いにどのような相関があるのか、また、3. 異なる表面構造を持つTiO<sub>2</sub> 表面上では、お互いの相関関係はどのように変化するのかなどを含めたその詳しいメカニズムを明らかにする。さらに、光エッチング処理を施したTiO<sub>2</sub> 基板を利用し、複数の指数面が共存するTiO<sub>2</sub> 上でのこれらのホール消費過程を同様に調べ、異なる指数面間でのホール移動過程や、面の境界エッジにおける反応プロセスを明らかにすることを目的

とする。

### 3. 研究の方法

初年度は、step-terrace 構造を正確に制御したルチル型 TiO<sub>2</sub> 単結晶基板を用い、水溶液中で紫外線照射、電位印可下で起きる発光、ラフニング、酸素発生、無輻射失活の4つの測定を行い、step-terrace 構造の影響、step 端における格子歪み、ホールの拡散異方性、運動性、印可電圧の影響などを明らかにする。次年度以降は、水溶液のpHを変えて同様の実験を行い、その影響を調べる。これら一連の研究結果より、単一指数面上におけるメカニズムから、異なる指数面共存下でのホール挙動まで、光触媒能を理解する上でTiO<sub>2</sub> 表面構造が担う役割を、包括的に明らかにする。

#### 1. Photoluminescence



#### 2. Nonradiative recombination

図1: TiO<sub>2</sub> 単結晶面上において、4つの反応が光生成したホールを競争的に消費する。(Reprinted with permission from ref. 7. Copyright American Chemical Society.)

### 4. 研究成果

ステップ密度およびステップ方向の異なる微傾斜TiO<sub>2</sub> 単結晶板の(110)面を用意し、水中、紫外光照射(高圧水銀灯)下での発光エネルギー、強度、また酸素発生による光電流、発光減衰速度を測定した。これによって、テラス幅の違いによる影響およびステップ端サイト構造の違いによる影響を調べた。

#### (1) 発光プロセス

2種類のstep方向(<001>, <110>方向)、2種類のterrace幅(step間隔10nm, 40nm)を持つTiO<sub>2</sub>(110)単結晶表面を用意した。紫外線照射下において、これらの試料から観測された発光強度を比較してみると、step間隔が狭いほど発光強度が減少し、また、同じstep間隔を持つ面同士でも、<001>方向に走るstep(以後、<001>step)を持つ表面の方が<110>方向に走るstep(以後、<110>step)を持つ表面よりも強い発光を示すことがわかった。前者からは、発光サイトがterrace上に多く存在していることが分かった。これは、発光サイトはterrace表面にある三配位酸素であるという、従来のモデルと一致する。後者は、stepの構造自体が発光強度に影響を与

えることを示しているが、これには2つ原因が考えられた。一つ目は、ホールの $\langle 001 \rangle$ 方向への拡散速度が、 $\langle 110 \rangle$ 方向へのそれよりも大きいため、step 端に捕まり他のプロセスに消費される確率が、 $\langle 110 \rangle$  step を持つ表面の方が高くなったことに起因するもの。2つ目は、step 端の結晶構造も異なるために、発光と競争的に反応が進行しているラフニング反応や無輻射失活の確率(ともに step 端で起きる)の違いが、発光確立に影響を与えたことによるものである。

## (2) ラフニングプロセス

次に、やはり副反応の一つ、表面ラフニング反応について考えてみる。これは光アノードエッチングと呼ばれる、ホールによる  $\text{TiO}_2$  の自己酸化溶解であると考えられる。図 2

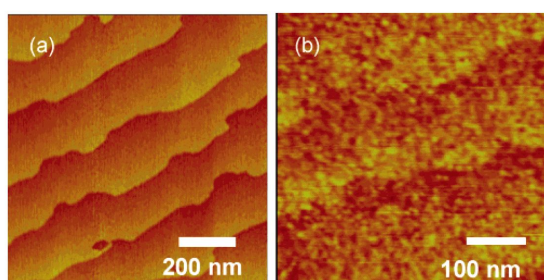


図 2 : UV 光照射前 (a) と照射後 (b) の  $\text{TiO}_2(110)$  面の AFM 像

(Reprinted with permission from ref. 7. Copyright American Chemical Society.)

に酸素発生前(a)と pH 1.1 溶液中で酸素発生後(b)の AFM 像を示す。見て分かるように、酸素発生後は明らかに表面の step-terrace 構造が乱れている。我々は、発光強度変化を見ることにより、ラフニング反応の反応効率を調べた。

その結果、テラス幅が小さいほどラフニング反応は速く、また同じテラス幅でも、step が  $\langle 110 \rangle$  方向に走っているものの方が、 $\langle 001 \rangle$  方向に走っているものよりもラフニング反応が速いことが分かった。前者からは、ラフニング反応が step 端を起点として起きていることが推測出来る。後者からは、このラフニング反応がその step 端の結晶構造に強く依存しており、 $\langle 110 \rangle$  step の方がラフニング反応が促進されることが分かる。実際、両者の step 構造を比較してみると、step 端の Ti に配位する酸素原子の数や構造が異なり、ラフニング反応に伴う結晶結合の開裂に必要な活性化エネルギーも大きくことが分かった。

## (3) 酸素発生、無輻射失活プロセス

発生した酸素は、密閉セル中で溶存酸素量変化をモニターすることによって、調べた。また、無輻射失活のホール消費効率は、光電流値と酸素発生効率から算出した。これらの実験でも、各プロセスが step-terrace 構造に非常に強く依存していることが分かった。

こうして、4つの反応プロセスと局所構造依存性を明らかにし、これらの結果から、ラフニング反応は、step のブリッジ酸素、発光は、terrace の三配位酸素、酸素発生は、terrace のブリッジ酸素を起点として起きていることが分かった。無輻射失活は、詳細な反応サイトまでは明らかにならなかったものの、step 端を起点にしていることが分かった。さらに、ラフニングと酸素発生が直接的に競争し、発光と無輻射失活がやはり直接的に競争していることが明らかになった。これら一連の結果は、面指数や step-terrace 構造を制御し、副反応を制御することにより、酸素発生効率を上げられることを示唆している。

## (4) ラフニングプロセスによる影響

一方、こうした議論は、構造変化の少ないラフニング反応の初期のものである。長時間ラフニング反応が続き、表面構造が変化すれば、全体のホール消費経路自体が変わる。この影響を調べるために、Mott-Schottky 測定と、CV 測定を併用し、ラフニング前後で光触媒活性(酸素発生プロセス)がどのように変化するかを調べた。その結果、ラフニングによって、表面局所構造が変化することによって、反応活性化エネルギーの低い新しい、酸素発生サイトが現れてくることが分かった。つまり酸素発生の反応効率やホールの消費過程は、光触媒反応中もダイナミックに変化していることを意味しており、これまでの静的な反応解析だけでは、不十分であることを示している。

## (5) pH による反応プロセスの違いと、表面局所構造の影響

さらに、詳しい解析により、酸性、中性溶液中では、我々が提唱してきた、ペロオキンド種を中間体とした反応プロセスで酸素発生が起きるが、アルカリ中では、表面水酸基に最初にホールがトラップされる(所謂、電子移動型反応)過程で、酸素発生反応が起きることが分かった。さらに、前者の反応過程では、中間体は表面局所構造の変化の影響を大きく受けるために、表面ラフニングや面指数、step-terrace 構造の違いの影響を、明確に受ける。一方で、後者の反応では、中間体の安定性(活性化エネルギー)が、表面局所構造の影響をあまり受けないことも明らかになった。

## (6) まとめ

本研究では、 $\text{TiO}_2$  の表面局所構造が水の光分解やその副反応に与える影響と、副反応を含めた4つの競争反応の相関関係を明らかにした。水の光分解に限らず、光触媒反応を制御するという事は、光生成したキャリアの消費プロセスを制御するという事には他ならない。キャリアの流れを総合的に理解することは、反応制御には必要不可欠である。

本研究が、今後の新しい光触媒設計の一助となることを期待する。

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 26 件)

- 1) 今西哲土、福井賢一 “低エネルギー量子線照射還元を利用したイオン液体中での金属微粒子合成”、触媒、56(2014)27-33. 査読有
- 2) 今西哲土 “酸化チタン表面での光生成ホールによる水の酸化分解反応機構とその競争的副反応”、触媒、56(2014)95-101. 査読有
- 3) Ken-ichi Fukui, Yasuyuki Yokota, Akihito Imanishi, “Local Analyses of Ionic Liquid / Solid Interfaces by Frequency-Modulation Atomic Force Microscopy and Photoemission Spectroscopy”, The Chemical Record, in press., 査読有
- 4) Tetsuya Tsuda, Yuichi Ikeda, Takashi Arimura, Masaki Hirogaki, Akihito Imanishi, Susumu Kuwabata, Gery R. Stafford, Charles L. Hussey, “Electrodeposition of Al-W Alloys in the Lewis Acidic Aluminum Chloride-1-Ethyl-3-Methylimidazolium Chloride Ionic Liquid”, J. Electrochem. Soc., in press., 査読有
- 5) Yasuyuki Yokota, Yoshitada Mino, Yuta Kanai, Toru Utsunomiya, Akihito Imanishi, Matthäus A. Wolak, Rudy Schlaf, Ken-ichi Fukui, “Comparative Studies of Photoelectron Spectroscopy and Voltammetry of Ferrocene-Terminated Self-Assembled Monolayers Possessing Different Electron-Donating Abilities”, J. Phys. Chem. C, 118(2014)10936-10943., DOI:10.1021/jp5023899, 査読有
- 6) Tetsuya Tsuda, Masaki Yamagata, Shohei Kusumoto, Akihito Imanishi, Itsuki Kokubo, Susumu Kuwabata, “Electrochemical Energy Storage Device with a Lewis Acidic AlBr<sub>3</sub>-1-Ethyl-3-methylimidazolium Bromide Room-Temperature Ionic Liquid”, J. Electrochem. Soc., in press., 査読有
- 7) Akihito Imanishi, Ken-ichi Fukui, “Atomic-scale Surface Local Structure of TiO<sub>2</sub> and its Influence on the Water Photooxidation Process”, J. Phys. Chem. Lett. (perspective), 5(2014)2108-2117., dx.doi.org/10.1021/jz5004704., 査読有
- 8) Etsushi Tsuji, Ken-ichi Fukui, Akihito Imanishi, “Influence of Surface Roughening of Rutile Single Crystalline TiO<sub>2</sub> on Photocatalytic Activity for Oxygen Photoevolution from Water in Acidic and Alkaline Solutions”, J. Phys. Chem. C, 118(2014)5406-5413. 10.1021/jp4126073 査読有
- 9) Yusuke Morino, Yuta Kanai, Akihito Imanishi, Yasuyuki Yokota, Ken-ichi Fukui, "Fabrication of

Ionic Liquid Ultrathin Film by Sequential Deposition Method", Jpn. J. Appl. Phys. 53(2014) 05FY01., 査読有

- 10) Tomohiro Harada, Yasuyuki Yokota, Akihito Imanishi, Ken-ichi Fukui, “Preferential Formation of Layered Structure of Ionic Liquid at Ionic Liquid Aqueous Solution / Graphite Electrode Interfaces Observed by Frequency-Modulation Atomic Force Microscopy”, e-J. Surf. Sci. Nanotechnol.12 (2014) 89-96. 10.1380/ejsnt.2014.89, 査読有
- 11) Susumu Kuwabata, Hiro Minamimoto, Kosuke Inoue, Akihito Imanishi, Ken Hosoya, Hiroshi Uyama, Tsukasa Torimoto, Tetsuya Tsuda, and Shu Seki, “Three-dimensional micro/nano-scale structure fabricated by combination of non-volatile polymerizable RTIL and FIB irradiation”, Scientific Reports, 4(2014)3722: DOI: 10.1038/srep03722. 10.1038/srep03722., 査読有
- 12) 今西哲土 “TiO<sub>2</sub> 電極表面上における光水分解反応メカニズム ~競争的副反応と原子レベル表面局所構造の影響~”, 光化学, 44(2013)81-85, 査読有
- 13) Yasuyuki Yokota, Hisaya Hara, Tomohiro Harada, Akihito Imanishi, Takafumi Uemura, Jun Takeya and Ken-ichi Fukui, "Structural investigation of ionic liquid / rubrene single crystal interfaces by using frequency-modulation atomic force microscopy", Chem. Commun, 49(2013)10596-10598. 10.1039/c3cc45338c, 査読有
- 14) Tetsuya Tsuda, Koshiro Kondo, Masahiro Baba, Shotaro Suwa, Yuichi Ikeda, Taiki Sakamoto, Satoshi Seino, Hiroyuki Yoshida, Masanori Ozaki, Akihito Imanishi, Susumu Kuwabata, “Physicochemical properties of 1-alkyl-3-methylimidazolium chloride-urea melts”, Electrochimica Acta, 100(2013)285-292. 10.1016/j.electacta.2012.05.156, 査読有
- 15) Tetsuya Tsuda, Yuichi Ikeda, Takashi Arimura, Akihito Imanishi, Susumu Kuwabata, Charles L. Hussey and Gery R. Stafford “Al-W Alloy Deposition from Lewis Acidic Room-Temperature Chloroaluminate Ionic Liquid”, ECS Transactions 50(2013)239-250. 10.1149/05011.0239ecst, 査読有
- 16) 今西哲土 “TiO<sub>2</sub> 電極表面の原子レベル局所構造と光水分解反応過程に及ぼす影響”, Electrochemistry, 2(2013)108-112, 査読有
- 17) Tetsuya Tsuda, Taiki Sakamoto, Yoshitomo Nishimura, Satoshi Seino, Akihito Imanishi, Kazuhiko Matsumoto, Rika Hagiwara, Taro Uematsu and Susumu Kuwabata, “Preparation of gold nanoparticles using reactive species produced in room-temperature ionic liquids by accelerated electron beam irradiation”, RSC Adv., 2(2012)11801-11807. DOI: 10.1039/c2ra21353b, 査読有

18) Kazuki Yoshii, Tetsuya Tsuda, Takashi Arimura, Akihito Imanishi, Tsukasa Torimoto and Susumu Kuwabata

“Platinum nanoparticle immobilization onto carbon nanotubes using Pt-sputtered room-temperature ionic liquid”, RSC Adv., 2(2012)8262-8264. DOI: 10.1039/c2ra21243a, 査読有

19) 今西哲士 “原子レベル平坦化 TiO<sub>2</sub> 単結晶表面上の湿式光反応プロセス”, 表面科学, 33(2012)323-328, 査読有

20) Susumu Kuwabata, Tsukasa Torimoto, Akihito Imanishi and Tetsuya Tsuda

“Introduction of Ionic Liquid to Vacuum Conditions for Development of Material Productions and Analyses”, Electrochemistry, 80(2012)498-503.

dx.doi.org/10.5796/electrochemistry.80.498, 査読有

21) Tetsuya Tsuda, Taiki Sakamoto, Yoshitomo Nishimura, Satoshi Seino, Akihito Imanishi, Susumu Kuwabata, “Various metal nanoparticles produced by accelerated electron beam irradiation of room-temperature ionic liquid”, Chem. Commun., 48(2012)1925-1927. DOI: 10.1039/c2cc16183d, 査読有

22) 今西哲士 “原子レベル平坦化 TiO<sub>2</sub> 単結晶表面上の湿式光反応プロセス”, 表面科学, 2012, pp. 328-333. 査読有

23) Etsushi Tsuji, Ken-ichi Fukui and Akihito Imanishi, “In-situ MIR-IR Observation of Peroxo Species on Anatase TiO<sub>2</sub> Particle during Oxygen Photoevolution Reaction”, Electrochemistry, 79 (2011)787-789.

dx.doi.org/10.5796/electrochemistry.79.787, 査読有

24) Kazuhide Kamiya, Etsushi Tsuji, Akihito Imanishi, Kazuhito Hashimoto, Shuji Nakanishi “Bistability in the surface dipole of silicon grafted with copper nanoparticles: an in-situ electrochemical MIR-FTIR study Electrochemistry Communications”, Electrochem. Commun., 13(2011)1447-1450.

DOI:10.1016/j.elecom.2011.09.027, 査読有

25) Akihito Imanishi, Shinobu Gonsui, Tetsuya Tsuda, Susumu Kuwabata, Ken-ichi Fukui

“Size and shape of Au nanoparticles formed in ionic liquids by electron beam irradiation”, Phys. Chem. Chem. Phys., 13(2011)14823 – 14830. DOI: 10.1039/c1cp20643e, 査読有

26) Etsushi Tsuji, Akihito Imanishi, Ken-ichi Fukui, Yoshihiro Nakato, “Electrocatalytic Activity of Amorphous RuO<sub>2</sub> Electrode for Oxygen Evolution in an Aqueous Solution”

Electrochimica Acta, 56 (2011) 2009–2016. DOI:10.1016/j.electacta.2010.11.062, 査読有

〔主な学会発表〕(計 15 件)

1) 今西哲士 “TiO<sub>2</sub>電極表面での光生成ホールによる水の酸化分解機構 ~ 原子レベル表

面局所構造の影響と競争的副反応 ~”, 電気化学会 電気化学会第81回大会(招待講演) 2014年03月30日, 大阪

2) 今西哲士 “二酸化チタン表面上における光分解メカニズムと競争的副反応”, 日本物理学会 第69回年次大会(招待講演), 2014年03月28日, 神奈川

3) 今西哲士 “ナノ細孔内でのイオン液体の特殊な構造とその反応場でのX線還元Au微粒子形成過程”, 第112回触媒討論会, 2013年09月19日, 秋田

4) Akihito Imanishi “Dependence of photooxidation reaction of water on atomic level surface local structure at TiO<sub>2</sub> single crystal electrode”, ISHHC-16, 2013年08月06日, Sapporo, Japan.

5) Akihito Imanishi “Surface Local Structure Dependence of Photooxidation Reaction of Water and its Competitive Sub Reactions on TiO<sub>2</sub> Single Crystal Electrode”, PASEC-2(招待講演), 2013年07月12日, Kyoto, Japan

6) Akihito Imanishi “Influence of Atomic Level Surface Local Structure on Photo-induced Oxidation Reaction of Water at Single Crystal TiO<sub>2</sub> Surface”, 223rd ECS Meeting(招待講演), 2013年05月12日, Toronto, Canada.

7) Akihito Imanishi, “Formation of Au particles in nanoconfined ionic liquids by low energy quantum beam irradiation”, 5th Congress on Ionic Liquids, 2013年04月21日, Algarve, Portugal

8) Akihito Imanishi “Surface local structure dependence of photooxidation reaction of water and its competitive subreactions on TiO<sub>2</sub> single crystal electrode”, The 2nd International Conference on Photocatalysis and Solar Energy Conversion: Development of Materials and Nanomaterials (PASEC-2)(招待講演), 2013年07月08日, Kyoto, Japan.

9) Akihito Imanishi “Influence of atomic level surface local structure on photo-induced oxidation reaction of water at single crystal TiO<sub>2</sub> surface”, 223rd ECS Meeting(招待講演), 2013年5月15日, Toronto, Canada.

10) Akihito Imanishi “Control of Formation Process of Au Nanoparticles Prepared by Low Energy Quantum Beam

Irradiation in Ionic Liquid”, Pacific Rim Meeting(PRIIME2012), 2012年10月12日, Hawaii, U.S.A.

11) Akihito Imanishi “Influence of surface local structure on photo-induced oxidation reaction of water on single crystal TiO<sub>2</sub> surface”, 19th International Conference on Photochemical Conversion and Storage of Solar Energy, 2012年07月31日, Pasadena, U.S.A.

12) Akihito Imanishi “Interface Segregation of Metal Ions in Ionic Liquids Studied by X-ray Photoelectron Spectroscopy”, 6th International Symposium on Surface Science (ISSS-6), 2011年12月13日, Tokyo, Japan.

13) Akihito Imanishi “Interface segregation of metal ions in ionic liquids studied by photoelectron spectroscopy”, 4th Congress on Ionic Liquids (COIL-4), 2011 年 06 月 17 日, Washington DC, U.S.A.

14) Akihito Imanishi “Behavior of Metal Ions at Interface of Ionic Liquids Studied by X-ray Photoelectron Spectroscopy”, 220th ECS(The Electrochemical Society) Meeting & Electrochemistry Energy Summit, 2011 年 10 月 12 日, Boston, U.S.A.

15) 今西哲士 “液相～固液界面における電子移動反応と分子論的アプローチ”, 2011 年黒田・太田シンポジウム(招待講演), 2011 年 08 月 06 日, 理化学研究所播磨研究所 (SPring-8)

〔図書〕(計 6 件)

1) 今西哲士 “固液界面と生体：ソフトナノテクノロジー” 問題と解説で学ぶ表面科学”, 共立出版, 2013, pp.133

2) 今西哲士 “半導体電極を用いた光電気化学測定” 電気化学/インピーダンス測定のノウハウと正しいデータ解釈“, 技術情報協会, 2013, pp.25-33.

3) 星永宏、今西哲士、内本喜晴 “電気化学便覧”, 丸善, 2013, pp. 206-211.

4) Susumu Kuwabata, Tsukasa Torimoto, Akihito Imanishi and Tetsuya Tsuda, “Ionic Liquids - New Aspects for the Future”, InTech (New York, USA), 2013, pp. 599-617.

5) 今西哲士 “イオン液体中での量子線照射還元による金属微粒子形成”, 化学工業, 2012, pp.51-57.

6) Tetsuya Tsuda, Akihito Imanishi, Tsukasa Torimoto, Susumu Kuwabata “Nanoparticle Preparation in Room-Temperature Ionic Liquid under Vacuum Condition” Ionic Liquids: Theory, Properties, New Approaches”, InTech (Vienna, Austria), 2011, pp.549-564.

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

<http://www.dma.jim.osaka-u.ac.jp/view?l=ja&u=2749>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

今西 哲士 (IMANISHI, Akihito)

大阪大学・大学院基礎工学研究科・准教授  
研究者番号：60304036