

平成22年6月1日現在

研究種目：基盤研究（A）
 研究期間：2006～2009
 課題番号：18206100
 研究課題名（和文）表面制御金属ナノ粒子による局所的電場増強を利用した色素増感太陽電池の開発
 研究課題名（英文）Development of dye sensitized solar cells using local electric field reinforcement with surface control metal nano particle

研究代表者
 伊原 学（IHARA MANABU）
 東京工業大学・炭素循環エネルギー研究センター・准教授
 研究者番号：90270884

研究成果の概要（和文）：表面修飾銀ナノ粒子を担持したDSCを作製し、ソーラーシミュレーター（AM=1.5, 100mW/cm²）を用いて照射下で電流-電圧特性を測定した。2 μmと薄いチタニア膜を用いているため色素のみのエネルギー変換効率が1.5%だったのに対し、銀ナノ粒子の担持によって2.5%までに増大させることに成功した。また、様々な表面修飾物を有する金属ナノ粒子を合成、担持して、変換効率との関係を調べた。

研究成果の概要（英文）： Photoelectric conversion efficiency (Eff) of a dye-sensitized solar cell (DSSC) was improved by localized surface plasmon on silver (Ag) nanoparticles modified with polyacrylate-based comb-shaped block copolymer. The polymer-modified Ag nanoparticles were inserted into pores of a TiO₂ film in a DSSC. Then, the characteristics of this photoabsorption enhanced DSSC (PE-DSSC) with the Ag nanoparticles were evaluated. To clarify the effect of Ag nanoparticles on the characteristics, the thickness of the TiO₂ film in the DSSC was 2 μm, thinner than that for a typical DSSC (10 μm). A PE-DSSC showed an improved Eff of 2.5%, compared with about 1.5% for a DSSC with no Ag nanoparticles.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	7,200,000	2,160,000	9,360,000
2007年度	11,400,000	3,420,000	14,820,000
2008年度	10,100,000	3,030,000	13,130,000
2009年度	8,300,000	2,490,000	10,790,000
年度			
総計	37,000,000	11,100,000	48,100,000

研究分野：エネルギー機能材料・デバイス、反応工学・プロセスシステム、エネルギー学
 応用物性・結晶工学、物理化学

科研費の分科・細目：総合工学・エネルギー学

キーワード：solar cell、dye-sensitized、metal nanoparticle、surface plasmon

1. 研究開始当初の背景

色素増感太陽電池は安価な湿式法で作成できるので、この効率を 20% 近くまで上げることができれば大きな実用化に向けた大きな技術革新になりうる。この色素増感型の太陽電池では色素は TiO_2 表面に吸着しているだけなので半導体膜に比べて色素/ TiO_2 膜の吸収係数は小さい。したがって、セル本体は半透明であり入射光を十分に利用できていない。光を十分に吸収させるために色素/ TiO_2 膜の膜厚を増加させると入射側で発生したキャリアが対極まで拡散しなくてはならない距離が増加する。そのため再結合によって消失するキャリアが増え、却って効率の低下を引き起こす。

研究代表者の伊原は、Graetzel らの太陽電池に用いられている色素を銀微粒子の上に吸着させることによって、銀微粒子の局所電場増強効果により色素の吸収係数を 149 倍にも増大させることに成功している。(Ihara *et al.*, *Journal of Physical Chemistry B*, 101, 5153(1997)) 局所電場増強効果とは、銀などのナノ粒子表面の自由電子が光照射によって集団で振動し、表面プラズモンが励起される際に局所的に電磁場が増大することを利用して半導体や色素の吸光度を増加させる物理効果である。この効果を利用して太陽電池を作成すれば色素/ TiO_2 膜の吸収係数が大幅に増加し、飛躍的な変換効率の向上が期待できる。申請者らは、1997 年以降局所電場増強効果を利用した太陽電池の高効率化に関する研究を行ってきた。そのなかで、下記の点が実際に太陽電池の高効率化に重要であることが分かってきた。要点は下記のような点である。

- (1) 金属ナノ粒子が電解液に溶解することを防ぐ手法が必要である。
- (2) 金属ナノ粒子を経由した逆電子移動過程を防ぐために適切な表面修飾が必要である。
- (3) 最小限の金属ナノ粒子で光吸収過程を促進させるために、チタニア-色素-金属ナノ粒子の位置をナノメートルオーダーで制御することが必要である。

そこで、本研究では「表面制御金属ナノ粒子による局所的電場増強を利用した色素増感太陽電池」を提案する。金属ナノ粒子を表面修飾し、かつチタニア表面に結合させることで、金属ナノ粒子の局所電場増強効果による光吸収係数の増大を最大限に生かし、色素増感太陽電池の高効率化を目的とした。表面修飾によって金属ナノ粒子をコート、かつチタニア-色素-金属ナノ粒子の位置をナノメートルオーダーで制御する。そのなかで表面修飾の種類と効率低下をもたらす逆電子移動過程との関係、および表面修飾と局所電場増強効果による吸光度増大率との関係を調べることとした。

2. 研究の目的

本研究では「表面制御金属ナノ粒子による局所的電場増強を利用した色素増感太陽電池」を提案する。金属ナノ粒子を表面修飾し、かつチタニア表面に結合させることで、金属ナノ粒子の局所電場増強効果による光吸収係数の増大を最大限に生かし、色素増感太陽電池の高効率化を目的とした。また、表面修飾によって金属ナノ粒子をコート、かつチタニア-色素-金属ナノ粒子の位置をナノメートルオーダーで制御することを目指した。そのなかで表面修飾の種類と効率低下をもたらす逆電子移動過程との関係、および表面修飾と局所電場増強効果による吸光度増大率との関係を調べた。

3. 研究の方法

表面修飾物の異なる金属ナノ粒子を合成し、石英基板上で各種色素と組み合わせた場合の吸光度変化を調べた。さらに、銀ナノ粒子については TiO_2 膜中に担持し、さらに色素増感太陽電池を作製して、その発電特性を評価した。

4. 研究成果

表面プラズモンによる近接場光と電場増強
ある特定の角度で金属膜表面に光を入射するとその表面で表面プラズモンが励起し、その反射裏面近傍では局所的に強い電磁場（エバネッセント光）が発生する。この表面プラズモンとエバネッセント光は表面方向に伝搬する性質を持ち、その励起は光の入射角に強く依存する。また、エバネッセント光の電磁場の広がりはおおよそ波長に依存する。このエバネッセント光による電場増強を

利用したものに ATR (Attenuated Total Reflection)法があり、結果として強い信号を得ることができることから、高感度分析の手法として FTIR 等の追加ユニットなどとして実用化されている。表面プラズモン、エバネッセント光の概念図を図に示す

図 2 に金属ナノ粒子に光が入射した場合の様子を示す。ナノ粒子表面では球外の電磁場が球近傍に局在した局在表面プラズモンが励起され、球表面に入射光よりも強い電磁場が形成される。これは、先に説明したエバネッセント光の一つとして分類できるが、前者と区別する意味で近接場光と呼ばれている。エバネッセント光と近接場光の応用上の大きな違いは、エバネッセント光がその励起が入射光の角度に制約を受けるのに対して、近接場光ではその制約を受けないこと、また、エバネッセント光ではその広がり波長に依存するのに対し、近接場光の広がり波長は、金属ナノ粒子のサイズに依存することである。これらのことから近年、加工技術への応用、顕微鏡などのプローブなどへの応用が期待されている。また、金属ナノ粒子によるラマン散乱強度の増強は、SERS (Surface Enhanced Raman Scattering) として知られ、その増強メカニズムについても研究が進められている。

上記した局在表面プラズモンによって形成される入射光よりも強い電場を有する近接場光を利用して、色素による光キャリア生成速度を向上させ、光電流の増加を実現し、色素増感太陽電池の変換効率を向上させることが本研究の目的である。

金属ナノ粒子による色素の吸光度増大

上述したように、当研究グループではこれまで銀 (Ag) ナノ粒子の局在表面プラズモンによる局所電場増強効果を利用し、色素の吸光度を 1.49 倍に増大させたことを報告している。これらの結果は、上記論文を参照いただくこととし、ここでは Ag ナノ粒子に代わり、金 (Au) ナノ粒子を利用した場合の結果を示す。Ag は電解液中のヨウ素と反応しセルの劣化を起こす可能性があるのに対し、化学的に安定な Au を用いればナノ粒子の電解液への溶解を防ぐ事ができる。したがって、金属ナノ粒子による光吸収の増大効果が長期的に失われないより安定な DSSC の作製が期待できる。Au ナノ粒子のプラズモンピークは Ag ナノ粒子よりも長波長側にあるため、色素としては Black dye (Bd) ; **[RuL'(NCS)₃:3TBA** (L = 2, 2', 2'' -terpyridyl-4, 4', 4''-tricarboxylic acid ; TBA = tetrabutylammonium) を用いた。

石英基板上において、Bd 溶液濃度 1×10^{-3} [mol/L] に対して Au ナノ粒子溶液濃度をそれぞれ変えた複合膜を作製した。図 3 に複

合膜の吸収スペクトルを、図 4 に複合膜の吸収スペクトルから Au ナノ粒子単体の膜の吸収スペクトルを引いた差スペクトルを示す。図 4 に示されるように Au ナノ粒子の添加によって吸光度は増加し、その増大率は Au の濃度が増加するにつれ増えた。また、滴下した Bd 溶液濃度が一定の場合、567nm 及び 640nm における吸光度の増大率は Au の面積濃度の増加に伴い増大した。

次に Au ナノ粒子溶液濃度 0.3wt% に対して Bd の濃度をそれぞれ変えた複合膜を作製した。図 5 に、複合膜の吸収スペクトルから Au ナノ粒子単体の吸収スペクトルを引いた差スペクトルを示す。Au ナノ粒子溶液濃度が一定の場合、Bd 溶液濃度が増加すると 640nm 付近の吸光度がより高くなる傾向を示した。

表面を修飾した銀ナノ粒子を担持した色素増感太陽電池

透明導電膜付ガラス上にスピンコーティング法により TiO₂ ペーストで薄膜を作製し (電極面積 5mm×5mm)、450℃ で焼結してチタニアナノ多孔質膜を作製した。この際、光吸収層の吸光度変化が DSC の発電特性に反映されやすくするため膜厚を 2μm と通常の約 1/5 程度とした。この膜を銀ナノ粒子 (アミン系修飾樹脂コロイド、日本ペイント (株) のエタノール溶液に浸した後、熱処理を行い吸光度を測定した。さらに、Ru 色素 ([Ru(dcbpy)₂(NCS)₂]·2H₂O) を上記膜に担持し光吸収特性を測定し、銀ナノ粒子の光吸収特性に対する効果を調べた。その後、白金微粒子をコートした対極と貼り合わせ電極間に電解液を注入して色素増感太陽電池を作製した。

銀ナノ粒子は一般的に用いられているヨウ素系電解液質溶液に溶解してしまう可能性があるため、電解質溶液として溶解する可能性のないコバルト系電解液とヨウ素系電解液の両方を使って DSC を作製し、評価した。作製した DSC の概念図を図 6 に示す。

図 7 にエタノールに分散可能なアルカンチオール修飾の銀ナノ粒子を Two-phase arrested growth 法により合成し担持した光吸収層の光吸収スペクトルを示す。色素のみの場合と比較して顕著に吸光度の増大が見られた。色素の MLCT によると考えられる 500~550nm 付近のショルダーが銀の担持によってブルーシフトした。これは石英基板上の結果と一致した。銀担持膜は銀ナノ粒子、色素および相互作用による光吸収の増大効果による吸収が反映されているものと思われる。

図 8 に Ag が溶解しないコバルト系電解液を用いた DSC の入射光光子フラックスと短絡電流密度から計算される収集効率 (incident photons to current conversion

efficiency, IPCE)の波長依存性を示す。コバルト系電解液を使っているため全体的にIPCEは低いものの、銀ナノ粒子の担持によって最大で1.73倍までIPCEを増加させることに成功した。通常のDSCでは他の条件が同じなら、おおよそ光吸収層の吸光度とIPCEが一致するが、今回の結果では吸光度とIPCEの相対的關係は維持されなかった。これらは、TiO₂多孔質膜中のAgと色素の担持量およびその位置によって異なるものと考えられる。光吸収では、担持された銀ナノ粒子、色素および相互作用による光吸収の増大効果による色素の吸収の増大すべてが吸光度に反映されるが、IPCEでは銀ナノ粒子やチタニアに吸着していない色素は光電流に寄与できずIPCEは増加しない。このことから、吸光度とIPCEの相対的關係に差が出たのではないかと考えられる。また、銀ナノ粒子の担持によってIPCEのピークがブルーシフトし、400nm付近のピークに対する500nm付近のピークの比が増加した。これらは、光吸収スペクトルの結果や上記石英基板上での結果に対応するものであった。

さらに、ヨウ素系電解液を用いた表面修飾銀ナノ粒子を担持したDSCを作製し、ソーラーシミュレーター(AM=1.5, 100mW/cm²)を用いて照射下で電流-電圧特性を測定した結果を表1に示す。2μmと薄いチタニア膜を用いているため色素のみのエネルギー変換効率が1.5%だったのに対し、銀ナノ粒子の担持によって2.5%までに増大させることに成功した。

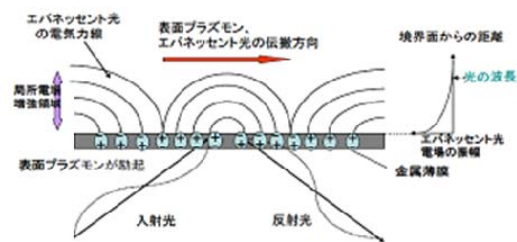


図1 表面プラズモン・エバネッセント光の概念図

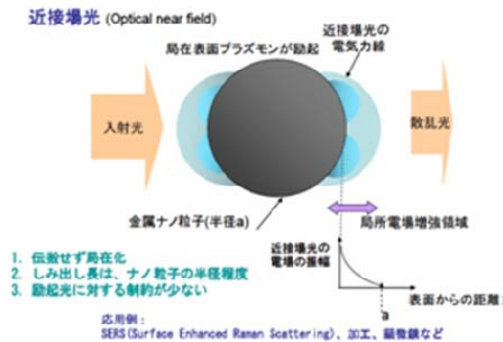


図2 金属ナノ粒子に光が入射したときの概念図

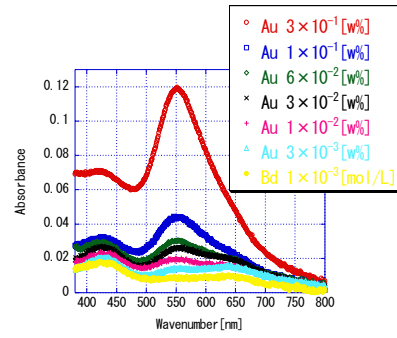


図3 Auナノ粒子Bd色素複合膜の光吸収スペクトルのAuナノ粒子溶液濃度依存性

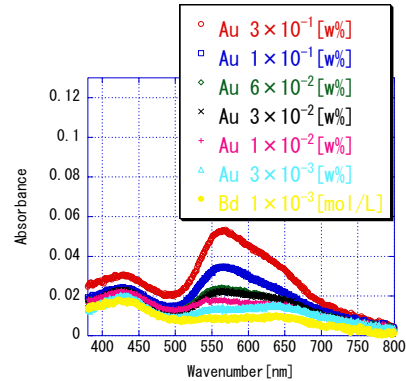


図4 複合膜の吸収スペクトルからAuナノ粒子単体の膜の吸収スペクトルを引いた光吸収スペクトル (Auナノ粒子溶液濃度依存性)

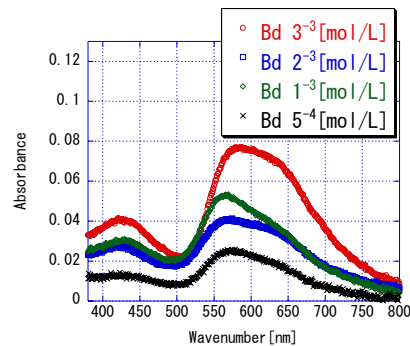


図5 複合膜の吸収スペクトルからAuナノ粒子単体の膜の吸収スペクトルを引いた光吸収スペクトル (Bd色素溶液濃度依存性)

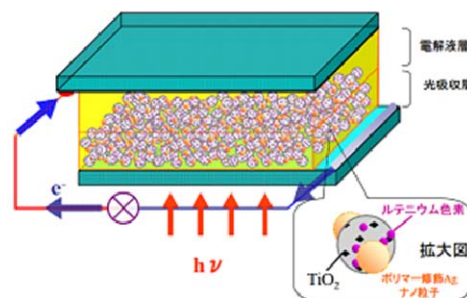


図6 金属ナノ粒子の表面プラズモンを利用する色素増感太陽電池構造の概念図

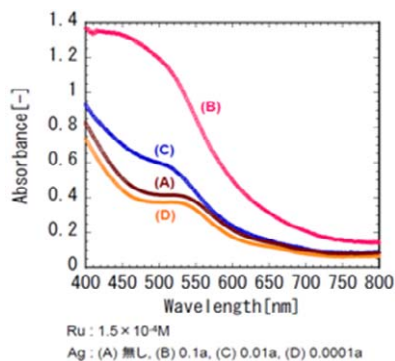


図7 チオール修飾Agナノ粒子と色素を担持したチタニア多孔質膜の光吸収スペクトル (膜厚 $2 \mu\text{m}$)

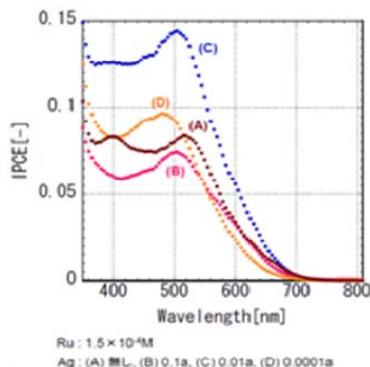


図8 チオール修飾Agナノ粒子と色素を担持したチタニア多孔質膜のIPCEスペクトル (膜厚 $8 \mu\text{m}$)

表1 ヨウ素系電解液を用いたDSCの電流-電圧特性 (AM = 1.5, $100 \text{mW}/\text{cm}^2$ 照射時)

	Voc [V]	Isc [mA/cm ²]	F.F. [-]	η [%]
Agナノ粒子無し	0.78	2.7	0.70	1.5
Agナノ粒子有り	0.81	4.4	0.69	2.5

膜厚 $2 \mu\text{m}$

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 10 件)

- ①M. Ihara, M. Kanno, and S. Inoue, Photoabsorption-enhanced dye-sensitized solar cell by using localized surface plasmon of silver nanoparticles modified with polymer, *Physica E*, in press, 2010, 査読有
- ②H. Shibuya, S. Inoue and M. Ihara, Evaluation of Dye-Sensitized Solar Cells using Forward Bias Applied Impedance Spectroscopy Under Dark, *ECS Transactions*, 16(50), 93-105, 2009, 査読有
- ③M. Enomoto, K. Taniguchi and M. Ihara, Dye-sensitized solar cells using localized surface plasmon of gold and silver nanoparticles with comb-shaped block copolymer, *ECS Transactions*, 25(42), 37-48, 2010, 査読有
- ④R. Ito, K. Oryu, H. Shibuya and M. Ihara, Dye-Sensitized Solar Cell using localized surface plasmon of Ag nanoparticles with different modulators, *Technical digest of*

17th International Photovoltaic Science, 6P-P5-05, 2007, 査読無

- ⑤伊原学, 金属ナノ粒子の局在表面プラズモンを利用した色素増感太陽電池の開発, *化学工学* 2007年7月号, P434~439, 査読無
- ⑥伊原学, 「太陽電池の高効率化技術としての表面プラズモンの可能性-金属ナノ粒子の局在表面プラズモンを利用する色素増感太陽電池」、特集「産業を支える粉粒体-材料・製法・計測技術と応用展開」日刊工業新聞社発行「工業材料」2009年11月号 Vo 1.57 No. 11 P56~60, 査読無

[学会発表] (計 55 件うち講演計 9 件)

- ①Loew Noya, 伊原学, 色素増感太陽電池への金属ナノ粒子とペプチド核酸の利用, 電気化学会第77回大会, 2010年3月31日, 富山大学
- ②谷口勝彦, 榎本幹男, 田中佑宜, 伊原学, 金ナノ粒子添加によるチタニア膜の光学特性の変化と色素増感太陽電池への応用, 化学工学会第75年会, 2010年3月20日, 鹿児島大学
- ③M. Enomoto, K. Taniguchi and M. Ihara, Dye-sensitized solar cells using localized surface plasmon of gold and silver nanoparticles with comb-shaped block copolymer, 216th ECS Meeting, October 9, 2009, Vienna, Austria
- ④谷口勝彦, 榎本幹男, 田中佑宜, 伊原学, 金ナノ粒子の局在表面プラズモンを利用した色素増感太陽電池の分光感度特性, 化学工学会第41回秋季大会, 2009年9月18日, 広島大学
- ⑤Loew Noya, 平野和希, 伊原学, ペプチド核酸のハイブリダイゼーションによる銀ナノ粒子の固定化と色素増感太陽電池への利用, 化学工学会第41回秋季大会, 2009年9月18日, 広島大学
- ⑥榎本幹男, 尾立樹一郎, 渋谷秀志, 伊原学, 金ナノ粒子の局在表面プラズモンを利用したDSSCの発電特性の評価, 化学工学会第74年会, 2009年3月18日, 横浜国立大学
- ⑦Noya Loew, 渋谷秀志, 田中佑宜, 伊原学, 表面プラズモンを利用した色素増感太陽電池におけるチタニアと金属ナノ粒子の距離制御, 化学工学会第74年会, 2009年3月18日, 横浜国立大学
- ⑧尾立樹一郎, 渋谷秀志, 榎本幹夫, 伊藤理人, 伊原学, 色素担持量を制御した色素増感太陽電池におけるAgプラズモン効果の定量的検討, 化学工学会第40回秋季大会, 2008年9月24日, 東北大学
- ⑨渋谷秀志, 榎本幹男, 伊藤理人, 伊原学, 局在表面プラズモン利用色素増感太陽電池における光吸収層構造の設計, 化学工学会第40回秋季大会, 2008年9月24日, 東北大学
- ⑩榎本幹男, 渋谷秀志, 尾立樹一郎, 伊藤理人, 伊原学, 局在表面プラズモン利用色素増感太陽電池における金属ナノ粒子の種類と発電特性の関係, 化学工学会第40回秋季大会, 2008年9月24日, 東北大学
- ⑪H. Shibuya, S. Inoue and M. Ihara, Evaluation of dye-sensitized solar cells using forward bias applied impedance spectroscopy under dark, 2008年10月13日, 米国電気化学会, ハワイ

- ⑫伊原学, 伊藤理人, 渋谷秀志, 尾立樹一郎, Co系電解液を使った局在表面プラズモン利用色素増感太陽電池の特長, 電気化学会第75回大会, 2008年3月29日, 山梨大学
- ⑬渋谷秀志, 伊藤理人, 尾立樹一郎, 伊原学, 局在表面プラズモンを利用した色素増感太陽電池におけるTiO₂多孔質構造制御, 日本化学会第88春季年会, 2008年3月26日, 立教大学
- ⑭渋谷秀志, 伊藤理人, 尾立樹一郎, 伊原学, 局在プラズモン利用色素増感太陽電池における多孔質構造とナノ粒子アンカー効果の制御, 化学工学会第73回年会, 2008年3月17日, 静岡大学
- ⑮R. Ito, K. Oryu, H. Shibuya and M. Ihara, Dye-Sensitized Solar Cell using localized surface plasmon of Ag nanoparticles with different modulators, 第17回太陽光発電国際会議, 2007年12月3日, 福岡国際会議場
- ⑯伊藤理人, 尾立樹一郎, 渋谷秀志, 伊原学, 表面修飾物の異なるAgナノ粒子が色素増感太陽電池の発電特性に与える影響と更なる効率向上の検討, 電気化学会秋季大会, 2007年9月19日, 東京工業大学
- ⑰伊藤理人, 尾立樹一郎, 渋谷秀志, 伊原学, Agナノ粒子を担持した色素増感太陽電池の発電特性とAgナノ粒子の修飾物との関係(2), 第39回化学工学会, 2007年9月13日, 北海道大学
- ⑱渋谷秀志, 伊藤理人, 尾立樹一郎, 伊原学, チタニア多孔質膜の微細構造と銀ナノ粒子担持色素増感太陽電池の発電特性, 第39回化学工学会, 2007年9月13日, 北海道大学
- ⑲伊藤理人, 井上志保, 伊原学, 修飾物の異なるAgナノ粒子の合成とそれらを担持した色素増感太陽電池の発電特性, 第74回電気化学会, 2007年3月29日, 東京理科大学
- ⑳伊藤理人, 井上志保, 伊原学, 銀ナノ粒子を担持した色素増感太陽電池の発電特性とAgナノ粒子の修飾物との関係, 化学工学会第72年会, 2007年3月19日, 京都大学
- ㉑伊藤理人, 井上志保, 伊原学, 異なるAgナノ粒子を光吸収層に担持した色素増感太陽電池の発電特性, 化学工学会第38回秋季大会, 2006年9月16日, 福岡大学
- ㉒井上志保, 伊藤理人, 伊原学, 銀ナノ粒子を担持した光吸収層の構造が色素増感太陽電池の発電特性に及ぼす影響, 化学工学会第38回秋季大会, 2006年9月16日, 福岡大学
- ㉓井上志保, 伊藤理人, 伊原学, 銀ナノ粒子を担持した光吸収層の構造が光吸収過程へ及ぼす影響とそれを用いた色素増感太陽電池の評価, 2006電気化学秋季大会, 2006年9月14日, 同志社大学
- ㉔伊原学, 井上志保, 菅野真然美, 伊藤理人, 銀ナノ粒子による局所電場増強とその色素増感太陽電池への応用, 2006電気化学秋季大会, 2006年9月14日, 同志社大学
〔招待講演〕
- ㉕伊原学, 金属ナノ粒子の表面プラズモンを利用する太陽電池, 化学工学会第41回秋季大会, 2009年9月17日, 広島大学
- ㉖伊原学, 第3世代太陽電池へのアプローチ—金属ナノ粒子の局在表面プラズモンを利用する色素増感太陽電池, 粉体工学会第45回夏季シンポジウム, 2009年8月10日, 浜名湖ロイヤルホテル

⑲伊原学, Dye-sensitized solar cells using localized surface Plasmon, The 14th International Conference on Modulated Semiconductor structures (MSS-14), 2009年7月21日, 神戸コンベンションセンター神戸国際会議場
〔依頼講演等〕

⑳伊原学, 金属ナノ粒子近傍の特殊な光を利用する太陽電池—局在表面プラズモンを利用した色素増感太陽電池, 化学工学会東北支部若手会セミナー, 2009年6月19日, 東北大学

㉑伊原学, 第3世代太陽電池の概要とプラズモン利用太陽電池, CVD反応分科会, 燃料電池・電池分科会合同シンポジウム 現在の太陽電池, 将来の太陽電池—性能とその製造技術—, 2010年3月10日, 東京工業大学

㉒伊原学, 金属ナノ粒子を活用した色素増感太陽電池の研究開発, 粉体工学会, 平成20年度第2回粉体接合研究会, 一環境、省エネに資する粉体接合プロセスの新展開—, 平成20年10月21日, 川崎

㉓伊原学, 「金属ナノ粒子の局在表面プラズモンを利用した色素増感太陽電池の高効率化」, 「色素増感太陽電池における耐久性/変換効率の向上技術」と題する講習会(技術情報協会主催、東京・大井町), 2008年8月25日

㉔伊原学, 「金属ナノ粒子による近接場光を利用する色素増感太陽電池」, 機能材料科学研究所第八回技術セミナー, 2008年3月7日, 飯田橋

㉕伊原学, 技術情報協会セミナー「色素増感太陽電池における(最新)材料設計・発電効率向上技術および性能評価」にて講演、金属ナノ粒子の表面プラズモンを利用した色素増感太陽電池, 2006.11.22, 大井町

〔図書〕(計4件)

- ①M. Ihara, Elsevier, Nanoparticle Technology Handbook, 分担執筆
APPLICATION5 「A DYE-SENSITIZED SOLAR CELL UTILIZING METAL NANOPARTICLE」
2007, P438~442
- ②伊原学, 細川益男監修, 日刊工業新聞社, ナノパーティクル・テクノロジーハンドブック(分担執筆)応用編, 2006, 総P561
(P.415-418)
- ③M. Ihara, Nanoparticle Technology Handbook, Elsevier (2007), 分担執筆
APPLICATION5 「A DYE-SENSITIZED SOLAR CELL UTILIZING METAL NANOPARTICLE」 P438~442
- ④伊原学, ナノパーティクルテクノロジーハンドブック、応用編5「金属ナノ粒子利用色素増感太陽電池」日刊工業、415-417 (2006)

〔その他〕

ホームページ
<http://www.chemistry.titech.ac.jp/~tamura/ihara/content.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊原学 (IHARA MANABU)
東京工業大学・炭素循環エネルギー研究センター・准教授
研究者番号: 90270884