

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：32708

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2023

課題番号：18K04269

研究課題名(和文) 光デバイス用銀ナノ構造体を用いた動的/静的スマートウィンドウの構築

研究課題名(英文) Fabrication of static / dynamic smart window by using silver nano-structure for optical devices

研究代表者

内田 孝幸 (Uchida, Takayuki)

東京工芸大学・工学部・教授

研究者番号：80203537

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：光を電磁波として捉えたとき銀ナノ粒子はその電磁波の振動を強く受けて、いわゆるプラズモンの挙動を示す。これらを巧みに操ることによって導電性を有するガラス面に鏡や黒表示以外にも多彩な光吸収を有するデバイスの構築について検討した。銀ナノ粒子に定常的もしくはパルス的な電界を加えることで、ナノ粒子の核生成と成長を制御し、目的のナノ粒子径を得ることでそれらに対応する吸収が得られる。これらは動的すなわち電界を印加した場合に変化させることが可能であるが、電界をかけない場合に、その状態を保持するような点に注目し、スマートウィンドウ(調光窓)などへの応用への知見を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球温暖化を抑制することは喫緊の課題であり、その一つの鍵を握るのは、冷暖房で消費するエネルギーである。大小にかかわらず建物の窓すなわち開口部は、熱流入・流出に強く関わっている。酷暑に見舞われる昨今、太陽の光を必要ときには遮り、逆に寒いときには積極的に太陽光を熱として取り込むような技術について検討した。これらの応用を目的として、光と強く相関をもつ銀ナノ粒子の粒径の分布を制御する技術を使って、動的/静的スマートウィンドウの構築を行った。

研究成果の概要(英文)：When silver nanoparticles take in light as electromagnetic waves, they are strongly affected by the vibrations of the electromagnetic waves and exhibit so-called plasmon behavior. By skillfully manipulating this phenomenon, we investigated the construction of devices with various light absorptions on conductive glass surfaces other than mirrors and black displays. By applying a steady or pulsed electric field to silver nanoparticles, nanoparticle nucleation and growth can be controlled to obtain the desired nanoparticle size and corresponding absorption. These nanoparticles were shown to change dynamically when an electric field is applied, but retain their state when no field is applied, which could be applied to smart windows (dimnable windows) and other applications.

研究分野：電子デバイスおよび電子機器関連

キーワード：プラズモン 銀ナノ粒子 熱遮蔽 スマートウィンドウ

## 1. 研究開始当初の背景

銀ナノ粒子は原子の中でも強く光と相関を有するものであり、一般にはプラズモン吸収としてその研究が進められている。光を電磁波として捉えたとき、その振動を銀のナノ粒子は強く受ける。その反面、銀ナノ粒子はその活性さが一因となって、凝集やマイグレーションを起こしやすいため、その安定化が課題であった。その相反する特性、すなわち活性、動的な特徴と安定、静的な両面の利点を引き出すべく検討を行った。特に、社会的背景として、建築物の熱流入、熱流出に大きなファクターとして効いてくる、窓ガラスの遮熱、放熱性は省エネルギー、地球温暖化を抑制する一つの技術として今でも位置付けられている。そこで、遮熱、放熱の機能を有するようなスマートウィンドウに銀ナノ粒子を用いたデバイスの構築が求められている。これらの利点と欠点を表裏一体で有するナノ粒子に関して特長を適切に引き出せるような新しい発想を伴った技術に注目が集まっている。申請者は銀のナノ粒子構造を有する場合にのみ生じる、光との強い相関性を保ちながら、相反する安定性を確保する方法について基礎的な物性の点ならびに応用展開の両面から検討する発想に至った。

## 2. 研究の目的

銀はナノ粒子の構造を有する場合に光の振動と極めて強い相関を示すため、このナノ粒子の状態を保ったまま、意図した凝集状態や、またその逆の分散状態を電氣的に生じさせ、さらにそれらを安定化して固定することで、例えば、粒度分布の幅の広い場合は黒色に、また、完全に凝集した場合は銀鏡になる。さらに特定の(ナノ)粒径に揃えられれば特定のプラズモン吸収によって色素を用いずとも、特定の色を発色することが可能である。これらは、理論的には説明可能であるが、これを実際は銀ナノ粒子の不安定さ(容易に凝集やマイグレーションを起こす)によって、実現するのが容易でない。このため、銀の活性なナノ粒子の状態、特長を保ったまま安定に扱える方法を基礎と応用の両面から検討し、相反する双方の利点・欠点を高い特性を保持して利用できるようにすることを目指す。

これらが達成または改善されることで、応用面としてスマートウィンドウ(調光窓)への適用が期待される。建築物における熱流入・流出の割合はその建築物の開口、すなわち窓に依存する割合が大きいため、この申請題目の技術を進展させることで、最終的には冷暖房による環境負荷の軽減を目指す技術的な知見を得ることを目的とする。

## 3. 研究の方法

銀ナノ粒子構造体を用いることで、光と強く相関をもつデバイスを構築できることは、強いプラズモン特性を示すことから分かっているが、その特徴を有意に引き出すためには1)銀ナノ粒子の安定性に関わる検討が必要である。銀ナノ粒子に代表される銀ナノ構造体の劣化と対策に関する基本的な考え方は銀塩写真フィルムで得られた知見を参考にして考えることができる。劣化の要因として酸化と銀イオンの移動および硫化があり、それらの第一段階である表面の銀原子の酸化と銀イオンの生成を抑制するためにパインダー(ゼラチン)の調整、自己組織化単層(Self-assembled monolayer; SAM)およびAgI被膜の形成により銀ナノ構造体の仕事関数を制御し、これまで筆者らは検討を行ってきた。

これらは、単に屋内でのデバイスの安定性だけにとどまらず、原子核乾板(荷電粒子の飛跡を記録するのに使われる特殊な写真乾板。普通の写真乾板に比べ臭化銀粒子が小さく、濃度が大きく、乳剤層は厚い。特別な方法で現像し、飛跡に沿って現れた銀粒子を顕微鏡で観測して入射粒子の種類、質量、エネルギー等を知るための銀塩フィルム)などの、宇宙線、ミュオンなどのイメージングも想定して安定性に基づくイメージングの検討も行う。

2)銀や金のナノ粒子は光と強い相関をもち、プラズモニックな挙動が顕著に現れる。これらの材料の安定化を基板の構造からアプローチし、凝集を防ぎ、ナノ粒子の孤立性を保持するようなテンプレートを構築し、材料自体だけでなく、基板やテンプレートからその特性を維持する。3)透明導電性を向上させる新規な方法として透明導電膜/銀ナノ粒子/透明導電膜いわゆるDMD(誘電体/金属ナノ粒子/誘電体)構造の透明性と導電性を併せ持つ材料の探索ならびに、それらを応用したデバイス、例えば透明アンテナなどの応用も視野に入れて検討を行う。

#### 4. 研究成果

この研究期間の中での成果は、具体体には5. 主な発表論文等に記載してあるが、概要をまとめると、査読付き論文9件であり、そのうち、宇宙線関連を含む銀の安定化についての論文が4件、基板、テンプレートによるナノ粒子の安定化が3件、銀ナノ粒子の透明導電膜、透明アンテナ関連が2件である。また、学会発表は12件である。特に、書籍では本テーマに直接関わるテーマとして2019年には「金属ナノ粒子、微粒子の合成、調製と最新応用技術」を、2021年には「エレクトロクロミックデバイスの開発最前線」で「第19章 銀イオンを用いた透明エレクトロクロミック素子の窓への応用と遮熱効果」を担当、さらに最終年度の2023年には「スマートウィンドウ(調光窓)の開発動向」の書籍において、「第2章 エレクトロクロミックの7 透明有機 EL と透明電気化学素子を組み合わせたスマートウィンドウ」について執筆をすることができた。これまで行ってきた、研究の内容は論文のリストにもあるように、銀ナノ粒子の安定化、テンプレートを用いた検討、さらには、透明導電性薄膜への応用など多岐に渡るが、最後の年度で、本申請の集大成として、申請題目である「光デバイス用銀ナノ構造体を用いた動的/静的スマートウィンドウの構築」について、書籍の一部ではあるが執筆した。これらによって、銀ナノ粒子の今後の発展と応用を、基礎から実用化の範囲で可能性と知見を示すことができた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Fukuro Koshiji, Yoji Yasuda, Yuri Yamada, Katsumi Yamada, Takayuki Uchida,	4. 巻 15
2. 論文標題 Transparent Antenna with High Radiation Efficiency and High Optical Transmittance Using Dielectric-metal-dielectric Composite Materials Based on ITO/Ag/ITO Multilayer Film	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Transactions of The Japan Institute of Electronics Packaging	6. 最初と最後の頁 E22-001-007
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5104/jiepeng.15.E22-001-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Ryuha MIYAKO, Kaito TODA, Takayuki UCHIDA, Toshifumi SATOH, Shota TSUNEYASU	4. 巻 33
2. 論文標題 Phthalate-based Electrochromic Device Using a Cellulose Substrate Enabling a Form of Reflective Representation As Designed	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ulletin of the Society of Photography and Imaging of Japan	6. 最初と最後の頁 7-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11454/ephotogrst.33.1_7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 T. Tani, A. Nishio, T. Uchida, K. Morishima	4. 巻 A 1006
2. 論文標題 Track formation in nuclear emulsion plates for cosmic-ray imaging with stabilized Ag nanoparticles	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Elsevier B.V., Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A	6. 最初と最後の頁 165427- 1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.nima.2021.165427	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 山田勝実、金沢恵美、常安翔太、越地福朗、内田孝幸、佐藤利文	4. 巻 83 巻 1 号
2. 論文標題 島状金ナノ粒子固定ITO 電極を用いたピロールの電解重合	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本写真学会誌	6. 最初と最後の頁 65-68
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Tadaaki Tani, Akira Nishio, Takayuki Uchida, Kunihiro Morishima	4. 巻 A 975
2. 論文標題 Latent image stabilization in nuclear emulsions for cosmic-ray imaging	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nuclear Inst. and Methods in Physics Research	6. 最初と最後の頁 164163_1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2020.164163	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Tadaaki Tani, Takayuki Uchida, Tatsuhiro Naka	4. 巻 129:106184
2. 論文標題 Analyses and design of nuclear emulsions for dark matter detection	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Radiation Measurements	6. 最初と最後の頁 106184
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.radmeas.2019.106184	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 山田勝実、金沢恵美、常安翔太、越地福朗、内田孝幸、佐藤利文	4. 巻 83
2. 論文標題 島状金ナノ粒子固定ITO電極を用いたピロールの電解重合	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本写真学会誌	6. 最初と最後の頁 65-68
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 Yasuda Yoji, Hoshi Yoichi, Kobayashi Shin-ichi, Uchida Takayuki, Sawada Yutaka, Wang Meihan, Lei Hao	4. 巻 37
2. 論文標題 Reactive sputter deposition of W03 films by using two deposition methods	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JOURNAL OF VACUUM SCIENCE & TECHNOLOGY A	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1116/1.5092863	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 Tadaaki Tani, Ryota Kan, Yuka Yamano and Takayuki Uchida	4. 巻 57
2. 論文標題 Stabilization of Ag nanostructures by tuning their Fermi levels	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics, Volume 57, Number 5	6. 最初と最後の頁 055001-1 ~ 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/JJAP.57.055001	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 -

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Yuri YAMADA, Fukuro KOSHIJI, Yoji YASUDA, Katsumi YAMADA, Takayuki UCHIDA
2. 発表標題 Reduction of Sheet Resistance and Improvement of Radiation Efficiency by Annealing Treatment of ITO Transparent Antenna
3. 学会等名 International Conference on Electronics Packaging 2022 (ICEP 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 谷 忠昭、浅田 貴志、内田 孝幸、中 竜大
2. 発表標題 原子核乳剤による暗黒物質検出：再結合過程の分析
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 谷 忠昭, 山口 友一, 西見 大成, 内田 孝幸, 工藤 昭彦
2. 発表標題 光触媒Zスキーム系による水の全光分解：構成要素と課題
3. 学会等名 2022 年度 日本写真 学会オンライン 年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 谷 忠昭、西尾 晃、内田 孝幸、森島 邦博
2. 発表標題 原子核乳剤の潜像退行の抑制 -ゼラチンとキレート剤の効果-
3. 学会等名 日本写真学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 谷忠昭, 西見大成, 内田孝幸, 山口友一, 工藤昭彦
2. 発表標題 光触媒による水の全光分解: Zスキーム系の電子構造の研究
3. 学会等名 第39回固体・表面光化学討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 谷忠昭, 西見大成, 内田孝幸, 山口友一, 工藤昭彦
2. 発表標題 全水分解用光触媒Zスキームシステムの電子構造の研究
3. 学会等名 日本写真学会 2020 年度オンライン秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takayuki Uchida
2. 発表標題 SMART WINDOW WITH LIGHT EMISSION, TRANSPARENT AND MIRROR STATE; STUDY OF NOVEL LIGHT EMITTING DEVICES FOR FURTHER OLEDs PROGRESS
3. 学会等名 International Conference on Radiation and Emission in Materials 2019 (ICREM-2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安田 洋司、小林 信一、内田 孝幸、星 陽一
2. 発表標題 低ダメージスパッタ法で堆積したITO上部電極膜有するトップエミッション型OLED素子の熱処理に関する検討
3. 学会等名 応用物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 谷 忠昭、西尾 晃、内田 孝幸、森島 邦博
2. 発表標題 宇宙線Imaging用原子核乳剤における銀微粒子の安定化
3. 学会等名 応用物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 谷忠昭、西尾 晃、内田 孝幸、森島 邦博
2. 発表標題 原子核乾板の潜像退行ー光電子分光による添加剤効果の検討ー
3. 学会等名 第6回画像関連学会連合会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 内田孝幸、常安翔太、川井翼、小泉佑輔、山田勝実
2. 発表標題 メッシュ状グリッド電極を有した銀電着型スマートウィンドウの検討
3. 学会等名 画像関連学会連合会 第5回秋季大会、日本写真学会
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 谷忠昭、中竜大、内田孝幸
2. 発表標題 暗黒物質検出用乳剤の分析：光電子分光の応用
3. 学会等名 画像関連学会連合会 第5回秋季大会、日本写真学会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計3件

1. 著者名 内田孝幸、他（合計57名）	4. 発行年 2021年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 558
3. 書名 金属ナノ粒子、微粒子の合成、調製と最新応用技術	

1. 著者名 樋口昌芳、小林範久、松井 淳、阿部正明、二川裕紀、久枝良雄、中村一希、安武幹雄、後藤博正、青木純、井上泰志、舟橋正浩、太田裕道、小野里尚記、金碩燦、星野勝義、田嶋一樹、古賀大尚、山田勝実、阿部良夫、内田孝幸、田原弘宣、村上裕人、相樂隆正	4. 発行年 2019年
2. 出版社 シーエムシー出版	5. 総ページ数 216
3. 書名 エレクトロクロミックデバイスの開発最前線	

1. 著者名 内田孝幸、他（合計34名）	4. 発行年 2023年
2. 出版社 シーエムシー出版	5. 総ページ数 208
3. 書名 スマートウィンドウ(調光窓)の開発動向	

〔産業財産権〕

〔その他〕

電子画像（内田）研究室  
<https://www.eng.t-kougei.ac.jp/denga/>  
東京工芸大学 研究者情報：内田孝幸  
[https://portal.kougei.net/kg/japanese/researchersHtml/80203537/80203537\\_Researcher.html](https://portal.kougei.net/kg/japanese/researchersHtml/80203537/80203537_Researcher.html)

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
---------	---------