

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 16 日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2013～2016

課題番号：25708020

研究課題名(和文) 発光性および強誘電ポリマーナノ粒子による新しいフォトニック結晶の構築

研究課題名(英文) Photonic crystals from fluorescent and ferroelectric polymer nanoparticles

研究代表者

山本 洋平 (YAMAMOTO, Yohei)

筑波大学・数理物質系・准教授

研究者番号：40589834

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 16,700,000円

研究成果の概要(和文)：共役ポリマーの自己組織化により形成するナノ～マイクロサイズの球体を用いた新しい光機能の発現を目指し、研究を進めた。その結果、マイクロ球体1粒子からの蛍光計測から、発光が球体内部に閉じ込められ共鳴するウィスパーリングギャラリーモード(WGM)発光の発現を見出した。また、これら発光性マイクロ共振器を用いた長距離光エネルギー移動と波長変換特性、WGMレーザー発振、強誘電ポリマーからなるコロイド結晶の構築などを実現した。

研究成果の概要(英文)：We discovered whispering gallery mode photoluminescence (WGM PL) from microspheres of self-assembled conjugated polymers. In the microspheres, PL is confined and resonated, resulting in periodic and sharp PL lines. Using these fluorescent microresonators, we further investigated long range light energy transfer and wavelength conversion, white color WGM PL, and laser oscillation. In addition, we achieved colloidal crystals from ferroelectric polymer nano spheres.

研究分野：分子集合体化学

キーワード：コロイド 球体 ポリマー WGM 自己組織化

1. 研究開始当初の背景

ナノ～マイクロメートルスケールのポリマービーズの集積化によるコロイド結晶の形成は、新しい光機能発現の観点で注目されている。特に可視～紫外光の波長領域に近いサイズのコロイドを集積化すると、3次元フォトニック結晶の実現が期待できる。これまでに、非共役ポリマーであるポリスチレン(PS)やポリメチルメタクリレート(PMMA)を用いて、サイズが制御されたポリマービーズによるコロイド結晶形成とフォトニック特性発現に関する報告がなされている。例えば、PSビーズの集積化によるフォトニックバンドギャップ形成、非線形光学効果、レーザー発振などである。一方で、PS、PMMA以外のポリマーからなるフォトニック結晶の報告は限られている。特に、申請者が現在進めている、 π 共役ポリマーによる3次元コロイド結晶構築およびフォトニック特性発現に関する報告はほとんどなく、強誘電ポリマーに至っては皆無である。

2. 研究の目的

本研究提案では、機能性ポリマービーズの形成と集積化による3次元コロイド結晶の構築と新規フォトニック特性に関して提案する。自己組織化制御により、発光性 π 共役ポリマーや強誘電ポリマーから任意のサイズと結晶性をもつコロイド粒子を構築し、さらにそれらを3次元的に集積することにより前例のないポリマーフォトニック結晶を作製する。発光波長や第2次高調波を周期構造と一致させることによる結晶内部への効率的な光閉じ込め、電荷注入による無閾値レーザー発振、高次高調波発生、励起子長寿命化による高効率太陽電池を実現する。

3. 研究の方法

本研究では、 π 共役ポリマーおよび強誘電ポリマーの自己組織化による球状構造体の形成、コロイド結晶の構築、およびフォトニック特性の発現に関して研究を進める。以下の3つに項目を分類し、それぞれについて具体的に記載する。

[1] 自己組織化による球状コロイドの形成 (サイズ制御、結晶構造制御、粒径による分離)

[2] コロイド結晶化・集積構造制御

[3] 光・電子物性評価 (発光特性、レーザー発振、強誘電特性、SHG 特性)

4. 研究成果

(1) 「 π 共役高分子による球状構造体形成における高分子主鎖の構造因子の解明」

ナノ～マイクロメートルサイズの微粒子を集積して作製するコロイド結晶は、新たな光機能を示す3次元フォトニック結晶の観点から注目されている。昨年、 π 共役ポリマーによるコロイド微粒子の作製を試み、あるパイ共役交互共重合ポリマーにおいて、球状

構造体が定量的に形成することを報告した (JACS 2013、図1)。本研究では、球状構造体のための構造因子に関する詳細な検討を行った。

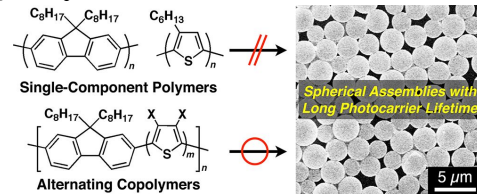


図1. 共役ポリマーの自己組織化によるマイクロ球体形成の模式図 (J. Am. Chem. Soc. 2013, 135, 870.)

π 共役高分子(図2)をクロロホルムなどの溶媒に溶解し(1 mg/mL)、MeOHなどの貧溶媒を蒸気拡散法によりゆっくりと加えることにより、ポリマーの自己集合化を行った。その結果、テトラメチルピチオフェン(TMT2)部位を繰り返しユニットにもつ高分子は球状構造体を形成しやすいことを見出した。一方、ピチオフェン部位をもつF8T2や、ドナーアクセプターポリマーであるDPP-TMT2は、不定形な析出物を生成するのみであった。

興味深いことに、溶液からのキャスト薄膜と比較して、球状構造体を形成することにより、光キャリアの寿命が数十～数千倍も長くなることを見出した。バルク試料においては広範囲の光キャリアが再結合に関与するが、球状微粒子においては粒子間における光キャリアの再結合が抑制されることが要因と考えられる。

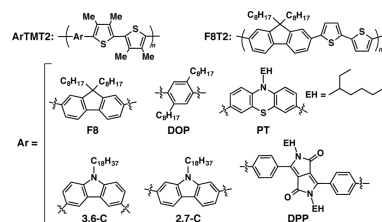


図2. Ar-TMT2 交互共重合体 (Ar = F8, DOP, PT, 3,6-C, 2,7-C, DPP) およびフルオレン-ピチオフェン交互共重合体 (F8T2)の分子構造 (Polym. Chem. 2014, 5, 3583.)

(2) 「 π 共役高分子マイクロ球体からの共鳴発光現象の発見」

共役高分子は、電荷輸送特性・発光特性・エレクトロクロミズムなど、光電子デバイスにおける有力な有機材料の一つとして注目されている。その中で、発生した光をキャビティー中に効率よく閉じ込めて増幅させる、高分子レーザー発振素子実現に向けた研究も多く行われている。光増幅法の一つとして、高屈折率な材料で構成する球体内部で光を全反射させて閉じ込める方法がある。このようにして増幅させた光は Whispering Gallery Mode (WGM) 発光と呼ばれる。本研究では、様々なパイ共役高分子からなる自己組織化マイクロ球体1粒子からの発光測定と詳細な解析を行った。

これまでに我々は、共役交互共重合体を溶液中での自己組織化により球状構造体を定量的に形成することを見出している(図 3 a-h)。作製した球の分散液を、SiO₂ (200 nm) /Si 基板上にスピコート法 (1000 rpm, 30 s) により滴下した後、大気下で乾燥し、球を基板表面に固定した。発光スペクトルは、波長 405 nm レーザーをマイクロ球のエッジ部分に照射し測定した。さらに、得られた WGM 発光と理論計算との整合性、連続照射による耐久性評価、曲率による Q 値プロットによる WGM 発現の閾値の測定を行った。

得られた球状構造体において、直径が 2 μm 以上の球体から、鋭い周期的な発光を観測した(図 3 i-l)。粒径が大きくなるにつれ、鋭い発光の間隔が狭くなり、密集したスペクトルへと変化した。このような鋭い発光は、球内部で全反射しながら閉じ込められた光の干渉による WGM 発光と呼ばれる。共役系高分子は、発光波長領域における屈折率 (n_{Polymer}) が 1.6–1.8 程度と、空気の屈折率 (n_{Air}) と比較して大きいことから、球内部において球面に沿う方向に発生した発光は全反射し、外に出ることなく球の最大直径を周回する。1 周旋回したところで光の位相が一致する場合に光波が強め合う。このような干渉による光強度の増強の条件は次式 $n\pi d = l\lambda$ (1) で表される。 n はポリマーの屈折率、 d は球の直径、 l は整数、 λ は発光波長を表す。また、理論との整合性や球の表面を Ti でコートする事で WGM 特性の低下を大幅に低減することを見出した。

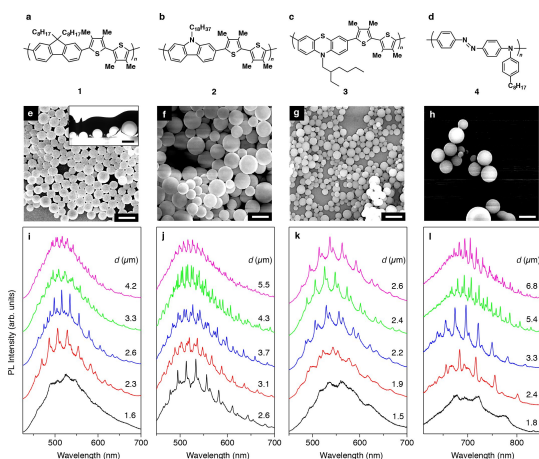


図 3 .(a-d) 共役交互共重合体の分子構造、(e-h) 自己組織化による球体形成、(i-l) 球体 1 粒子からの WGM 発光 (Sci. Rep. 2014, 4, 5902.)

(3) 「孤立 π 共役高分子マイクロ球体からの WGM 共鳴発光」

共役高分子から形成する直径数百ナノメートルの球状コロイドが、発光性コロイドフォトニック結晶のような新しい光機能材料の可能性から注目されている。これに関して、我々はこれまでに、溶液プロセスにおける自己組織化過程において、共役交互共重合体が形状の整ったマイクロ球体を定量的

に形成することを報告した。さらに、マイクロ球体 1 粒子へのレーザー照射により、明瞭な Whispering Gallery Mode (WGM) 発光が発生することを見出した。これらのポリマーの屈折率は 1.6-1.8 であり、空気と比較して十分に大きいことから、球体内で発生した発光はポリマーと空気の界面で全反射して効率的に球体内部に閉じ込められる。

本研究では、固体状態の発光量子収率 (Φ_{PL}) が 0.09–0.49 と、これまでに報告した共役交互共重合体 ($\Phi_{\text{PL}} < 0.02$) と比べて大きな孤立共役高分子 (Isolated conjugated polymer, ICP) に着目した。これらの高分子は共役系からなる主鎖骨格の周りを絶縁性側鎖で覆った構造をしている。主鎖がお互いに孤立して存在するため、主鎖間での相互作用による無輻射失活が効果的に抑制されることから、これらのポリマーは固体状態においても高い発光量子収率を示す。また、この被覆構造により高分子は結晶性が低く、アモルファスな薄膜を形成する。低い結晶性は、液中の自己組織化プロセスにより球状構造体を形成するために重要な要素である。我々は複数の ICP を用いて、蒸気拡散法による自己組織化を試みた。その結果、そのうちのひとつにおいて、形状の整った球状構造体が形成することを見出した(図 4)。得られた球体を用い、一粒子へのレーザー照射による発光スペクトルを観測した結果、明瞭な WGM 発光を観測した。さらに、μ-PL 計測による WGM 発光特性が、自己組織化条件の違いによる表面形状や真球度の違いを極めて鋭敏に検知できることを明らかにした。

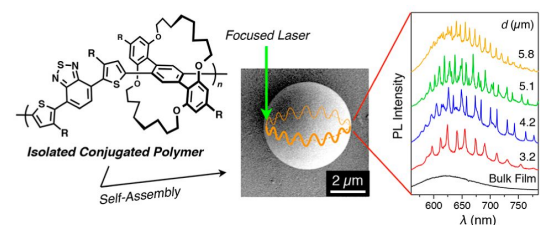


図 4. ICP の自己組織化によるマイクロ球体の形成と WGM 発光スペクトル (Macromolecules 2015, 48, 3928.)

(4) 「ポリフッ化ビニリデンナノ粒子のコロイド結晶化とイオン液体誘起 相化」

光の波長と同程度の周期構造を有するフォトニック結晶は、特異的な光学特性から、さまざまなフォトニックデバイスへの応用が期待されている。とりわけ、サブミクロンサイズのポリマービーズからなるコロイド結晶は、リソグラフィ等のプロセスを必要とせず比較的容易にフォトニック結晶を作製することが可能であるという点で注目されている。近年活発に研究が進められているポリマーコロイド結晶の多くは、ポリスチレンや PMMA など、それ自体は電気的あるいは光学的な特性を示さない高分子の球から作製されている。我々は、電子あるいは光機能を有するポリマー材料からコロイド結晶

を作成することにより、新しいフォトニック特性を示す材料が構築できないかと考え、強誘電ポリマーとして知られるポリフッ化ビニリデン(PVDF)に着目した。もし、強誘電ポリマーである PVDF からコロイド結晶を作成できれば、強誘電材料が有する第二次高調波(SHG)の発生、そしてコロイド結晶の持つ光の閉じ込めという二つの物性を掛け合わせ、これまでにない光学特性の発現が期待できる。すなわち、周期構造内への SHG の閉じ込めと高密度化、さらなる高次高調波の発生などが考えられる。

PVDF は、all-trans 配座の β 相、trans-gauche 配座の α 相、 α 相と β 相の中間状態である γ 相の三つの結晶構造が主に存在する。この中で、all-trans 配座である β 相は、水素(δ^+)とフッ素(δ^-)が配向分極しており強誘電性を示す。一方、構造的には α 相が最安定相であることから、強誘電相である β 相を実現するためには、延伸処理やポーリング処理などが必要となる。

本研究では、入手した α 相 PVDF ナノ粒子にイオン液体 ($[\text{EMIM}]\text{NO}_3$) を添加し、複合体の融点より少し低い温度でアニールすることで、ナノ粒子の形状を保持しつつ、部分的な相化を実現した(図5)。また、 α 型 PVDF のコロイド集積化を行った後、イオン液体を浸漬させ、アニールを行うことで、一部 β 相化したコロイド集積薄膜の作成を行った。作成した β 相化 PVDF コロイド結晶薄膜は、イオン液体添加とアニールによる相化後においても構造色を示し、微粒子により周期構造を保持していることが明らかになった。

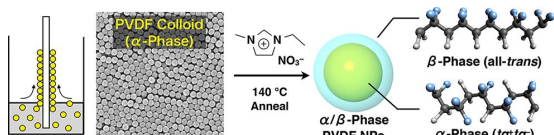


図 5. PVDF ナノ粒子のコロイド結晶化と表面の相化の模式図 (*Macromolecules* 2015, 48, 2570.)

(5)「効率的で長距離の光エネルギー移動が可能な共役ポリマーブレンドマイクロ球体」

互いにエネルギー供与性、受容性の関係にある高発光性共役高分子を用い、溶液中での自己組織化により、マイクロ球体を作製した。また、これらの高分子を混合して同時自己組織化を行うことにより、相分離することなく非常に高い双溶性で混合したポリマーブレンド球体の形成に成功した。球体1粒子の顕微発光計測から、発光が球体内部に閉じ込められ、自己干渉により増強するウィスパリングギャラリモード(WGM)発光が、作製したいずれの球体からも観測された。興味深いことに、ブレンド球体の方が、各ポリマー単体からなる球体よりも蛍光量子収率(ϕ_{PL})が高く、エネルギーアクセプターポリマーの混合比が20%のときに最大値 $\phi_{\text{PL}} = 0.22$ を示した。また、球体間においても WGM を介し

た効率的な光伝搬が起こることを、同種および異種ポリマー球体間において観測し、光伝搬の際に、波長変換が起こることを見出した。一般に、放射型エネルギー移動はロスが大きいが、WGM を介することで球体間での効率的な光伝搬と光エネルギー変換を実現した。マイクロ球体による光閉じ込め効果を利用した、新しい超広域光捕集の構築が期待できる。

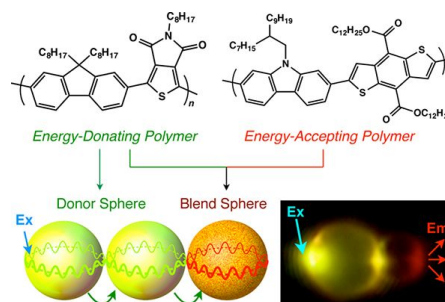


図 6. 共役ポリマーブレンド球体における、球体内および球体間における高効率光エネルギー移動の模式図 (*ACS Nano* 2016, 10, 5543.)

(6)「発光色を変調可能な共鳴発光とキャピティを介した多段階エネルギー移動」

蛍光色素 BODIPY が凝集状態の違いにより異なる発光色を示すことを利用し、ポリスチレン(PS)マイクロ球体共振器への BODIPY のみの添加で、緑・黄・橙・赤など発光色の異なる WGM 共鳴発光を観測した。このマルチカラー発光球体は、液液界面における PS の析出により作製され、溶媒条件を適切に調整することにより、BODIPY 添加量を制御した粒径 3–10 μm 程度の形状の整った球体を形成した。また、マイクロマニピュレーションにより異なる発光色の球体を連結し、その一端をレーザー励起することで、発光が球体間を WGM を介して伝搬し、多段階発光波長変換を実現した。

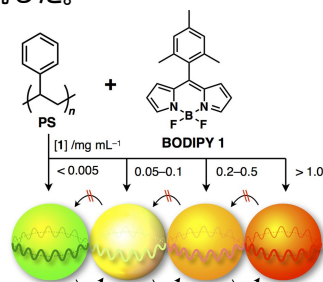


図 7. 蛍光色素(BODIPY)を添加したポリスチレン球体による多色共鳴発光および球体間エネルギーカスケードの模式図 (*ACS Nano* 2016, 10, 7058.)

(7)「共役ポリマー球体からの WGM レーザー発振」

有機光エレクトロニクスにおける課題の一つに、電荷注入発光によるレーザー発振の実現が挙げられる。これまで様々な共振器素子構造が候補として試されてきたが、有機物素子が電荷注入によってレーザー発振が実現された例はない。共振器構造としてマイク

口球体からなる WGM 共振器が挙げられる。WGM 共振器は光の閉じ込め効率が高いため、光の損失が少なく、レーザー発振の低閾値化が期待される。しかしながら、共役ポリマーのみから形成するマイクロ球体によるレーザー発振はまだ報告されていない。

今回、ミニエマルジョン法を用いて光耐久性の高いポリフルオレン (F8) という共役ポリマーからなるマイクロ球体を作製した。その球体 1 粒子に対し、フェムト秒パルスレーザーを照射し、発光スペクトルを計測した結果、 $1.5 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ の低閾値での青色レーザー発振が観測された。レーザー強度の半減値は 43000 パルスと高い耐久性を示した。また、緑色、赤色に発光する共役ポリマー球体もレーザー発振が確認された (図 8)。

さらなる特性向上を求めた結果、銀基板上に固定化した F8 球体は閾値が $1/4$ に下がるという結果を得た。FDTD シミュレーションから、銀基板による反射と基板への光の漏れの少なさによるミラー効果であることが明らかになった。さらに、酸化チタンでコートされた球体はレーザー強度の半減値が 43000 回から 120000 回まで向上し、ダメージ閾値も $23 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ から $58 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ まで向上した。色素分散系も含めた既存のレーザー材料の中で最も耐久性の高いものの中の 1 つである。

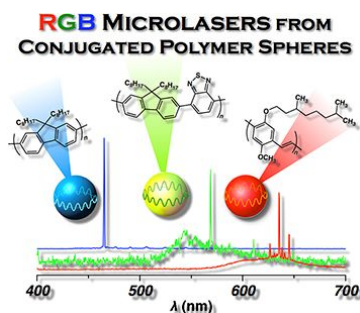


図 8. 様々な発光を示す共役ポリマー球体からのレーザー発振の模式図 (*Adv. Opt. Mater.* **2017**)

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 11 件)

[1] Soh Kushida, Daichi Okada, Fumio Sasaki, Zhan-Hong Lin, Jer-Shing Huang, Yohei Yamamoto, “Low-Threshold Whispering Gallery Mode Lasing from Self-Assembled Microspheres of Single-Sort Conjugated Polymers” *Adv. Opt. Mater.* **2017**, 5, 1700123. (査読有)
DOI: 10.1002/adom.201700123

[2] Yohei Yamamoto, “Spherical resonators from π -conjugated polymers” (Focus Review) *Polym. J.* **2016**, 48, 1045–1050. (査読有)
DOI: 10.1038/pj.2016.81

[3] Daichi Okada, Takashi Nakamura, Daniel Braam, Thang Duy Dao, Satoshi Ishii, Tadaaki

Nagao, Axel Lorke, Tatsuya Nabeshima, Yohei Yamamoto, “Color-Tunable Resonant Photoluminescence and Cavity-Mediated Multistep Energy Transfer Cascade” *ACS Nano* **2016**, 10, 7058–7063. (査読有)
DOI: 10.1021/acsnano.6b03188

[4] Soh Kushida, Shinnosuke Okabe, Thang Duy Dao, Satoshi Ishii, Tadaaki Nagao, Akinori Saeki, Masashi Kijima, Yohei Yamamoto, “Self-assembled polycarbazole microspheres as single-component, white-colour resonant photoemitters” *RSC Adv.* **2016**, 6, 52854–52857. (査読有)
DOI: 10.1039/C6RA10662E

[5] Yusuke Aikyo, Soh Kushida, Daniel Braam, Junpei Kuwabara, Takahiro Kondo, Takaki Kanbara, Junji Nakamura, Axel Lorke, Yohei Yamamoto, “Enwrapping Conjugated Polymer Microspheres with Graphene Oxide Nanosheets” *Chem. Lett.* **2016**, 45, 1024–1026. (Selected as Editor’s Choice) (査読有)
DOI: 10.1246/cl.160504

[6] Soh Kushida, Daniel Braam, Thang Duy Dao, Hitoshi Saito, Kosuke Shibasaki, Satoshi Ishii, Tadaaki Nagao, Akinori Saeki, Junpei Kuwabara, Takaki Kanbara, Masashi Kijima, Axel Lorke, Yohei Yamamoto, “Conjugated Polymer Blend Microspheres for Efficient, Long-Range Light Energy Transfer” *ACS Nano* **2016**, 10, 5543–5549. (査読有)
DOI: 10.1021/acsnano.6b02100

[7] Daniel Braam, Soh Kushida, Robert Niemöller, Günther M. Prinz, Hitoshi Saito, Takaki Kanbara, Junpei Kuwabara, Yohei Yamamoto, Axel Lorke, “Optically induced mode splitting in self-assembled, high quality-factor conjugated polymer microcavities” *Sci. Rep.* **2016**, 6, 19635/1–6. (査読有)
DOI: 10.1038/srep19635

[8] Soh Kushida, Daniel Braam, Chengjun Pan, Dao Duy Thang, Kenichi Tabata, Kazunori Sugiyasu, Masayuki Takeuchi, Satoshi Ishii, Tadaaki Nagao, Axel Lorke, Yohei Yamamoto, “Whispering Gallery Resonance from Self-Assembled Microspheres of Highly Fluorescent Isolated Conjugated Polymers” *Macromolecules* **2015**, 48, 3928–3933. (査読有)
DOI: 10.1021/acs.macromol.5b00707

[9] Daichi Okada, Hideki Kaneko, Katsuhiro Kato, Seiichi Furumi, Masaki Takeguchi, Yohei Yamamoto, “Colloidal Crystallization and Ionic Liquid Induced Partial β -Phase Transformation of Poly(Vinylidene Fluoride) Nanoparticles” *Macromolecules* **2015**, 48, 2570–2575. (査読有)

DOI: 10.1021/acs.macromol.5b00337

[10] Kenichi Tabata, Daniel Braam, Soh Kushida, Liang Tong, Junpei Kuwabara, Takaki Kanbara, Andreas Beckel, Axel Lorke, Yohei Yamamoto, “Self-Assembled Conjugated Polymer Spheres as Fluorescent Microresonators” *Sci. Rep.* **2014**, *4*, 5902/1-5. (査読有)
DOI: 10.1038/srep05902

[11] Liang Tong, Soh Kushida, Junpei Kuwabara, Takaki Kanbara, Noriyuki Ishii, Akinori Saeki, Shu Seki, Seiichi Furumi, Yohei Yamamoto, “Tetramethylbithiophene in π -Conjugated Alternating Copolymers as Effective Structural Component for the Formation of Spherical Assemblies”, *Polym. Chem.* **2014**, *5*, 3583–3587. (Back Cover Picture に採択) (査読有)
DOI: 10.1039/c4py00023d

〔学会発表〕(計 142 件、うち招待・依頼講演 17 件)

[1] 山本洋平、「共役系高分子マイクロ球体による共鳴発光現象と発光材料としての応用」高分子学会 印刷・情報記録・表示研究会および光反応・電子用材料研究会(東京理科大学神楽坂キャンパス、東京都新宿区)2015 年 10 月 9 日

[2] 山本洋平、「 π 共役高分子球体による発光性マイクロ共振器の開発」第 64 回高分子討論会(東北大学川内キャンパス、宮城県仙台市)2015 年 9 月 15–17 日(高分子学会日立化成賞受賞講演)

[3] 山本洋平、「パイ共役ポリマーコロイドの形成と特異な発光特性」物質デバイス共同研究拠点シンポジウム(東京工業大学資源研、神奈川県横浜市)2013 年 12 月 10 日

[4] 山本洋平、「分子集合体の電子・光機能発現」大阪大学永契会 60 周年記念講演会(大阪大学理学部、大阪府豊中市)2013 年 11 月 2 日

[5] Yohei Yamamoto, “Electroactive Nanomaterials from π -Conjugated Molecules and Polymers” 中国科学院上海有機化学研究所セミナー(上海、中国)2013 年 6 月 18 日(招待講演)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 7 件)

名称: 強誘電ポリマー球体およびその製造方法

発明者: 山本洋平、岡田大地

権利者: 筑波大学

種類: 特願

番号: 2015-091730 号

出願年月日: 2015 年 4 月 28 日

国内外の別: 国内

名称: 発光素子およびそれを備えたレーザーデバイス

発明者: 山本洋平、櫛田創

権利者: 筑波大学

種類: 特願

番号: 2015-035656 号

出願年月日: 2015 年 2 月 25 日

国内外の別: 国内

名称: 高分子球体アレイおよびその作製方法

発明者: 山本洋平、童亮

権利者: 筑波大学

種類: 特願

番号: 2014-170974 号

出願年月日: 2014 年 8 月 25 日

国内外の別: 国内

名称: 球状ポリマー粒子及び光学素子

発明者: 山本洋平、田畑顕一、アクセル ロルケ、ダニエル ブラーム

権利者: 筑波大学

種類: 特願

番号: 2014-009724 号

出願年月日: 2014 年 1 月 22 日

国内外の別: 国内

名称: 相ポリフッ化ビニリデンナノ粒子の作製と応用

発明者: 山本洋平、岡田大地

権利者: 筑波大学

種類: 特願

番号: 2013-143591 号

出願年月日: 2013 年 7 月 9 日

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等:

http://www.ims.tsukuba.ac.jp/~yamamoto_lab/Hompage_Japanese/toppu.html

受賞(計 3 件):

[1] 2015 年度高分子学会日立化成賞「 π 共役高分子球体による発光性マイクロ共振器の開発」(2015 年 9 月)

[2] 筑波大学若手教員特別奨励賞(2014 年 6 月)

[3] 平成 26 年度 文部科学大臣表彰 若手科学者賞「優れた光電子機能を示す分子集合体材料の創成に関する研究」(2014 年 4 月)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 洋平 (YAMAMOTO Yohei)

筑波大学・数理物質系・准教授

研究者番号: 40589834