

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：14303

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H05410

研究課題名(和文) 銀ナノビルディングブロックの創製と光組織化を利用した透明ポリマー電極の開発

研究課題名(英文) Synthesis of silver nanobuilding blocks and development of transparent polymer electrodes using photoreactions

研究代表者

中西 英行 (Hideyuki, Nakanishi)

京都工芸繊維大学・材料化学系・准教授

研究者番号：20619655

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,000,000円

研究成果の概要(和文)：本報告書では、ナノ結晶を分散させた溶媒が化学変化すると、それによって生じる空間的な濃度の偏りに沿ってナノ結晶が自己組織化することを報告する。モデル系として、ポリオール法で合成した銀ナノワイヤーを2-Hydroxyethyl methacrylate (HEMA) に分散させた溶液を用い、格子状にパターンしたフォトマスクを介して光照射し、HEMAを重合した。銀ナノワイヤーはPHEMAの濃度が低い領域に集合し、空間的な強度の分布に応じて集合体の大きさは変化した。また、誘起した銀ナノワイヤーの集合構造は、生成したフィルムのシート抵抗に大きく影響した。

研究成果の概要(英文)：We report that silver nanocrystals are self-assembled into ordered structures by the spatial concentration gradients created by a chemical reaction of a dispersive solvent. As a model system, we used dispersions of the silver nanowires in 2-hydroxyethyl methacrylate, HEMA. The dispersions were exposed to UV-light through a lattice-patterned photomask, to induce photopolymerization of HEMA. The silver nanowires migrated to the area in which the concentration of the poly(2-hydroxyethyl methacrylate) is low, and the size of the self-assembled structures varied with the spatial intensity distribution of the light. In addition, the sheet resistance of the resulting polymer films were influenced by the self-assembled silver nanowire structures.

研究分野：ナノ材料化学

キーワード：相分離 自己触媒反応 自己組織化

1. 研究開始当初の背景

ナノ結晶を自己組織化させた集合体は、協同的な性質を示し、高度な光学的または電子的な機能を発現することが報告されている。これまでに、正負に帯電した配位子や可逆的に光反応する分子でナノ結晶を被覆し、それらの分子間に働く静電相互作用や双極子-双極子相互を利用して、ナノ結晶は自己組織化されてきた。この他にも、ナノ結晶を自己組織化させる方法は数多く提案されているが、それらの多くはナノ結晶のサイズや形状、保護分子などのビルディングブロック自体の性質に依存している。

2. 研究の目的

本研究では、上述の課題のうち、主に配線素材としての銀ナノ結晶を合成し、フィルム内でナノ結晶を自発的に集合させて配線することを目的とした。

3. 研究の方法

目的を達成するために、(1) 高い電気伝導性を実現する銀ナノ結晶の設計と合成を行った。また、(2) 光照射によって混合系を相分離させ、銀ナノ結晶を空間的に濃縮させて電気的に接合した。

4. 研究成果

本報告書では、ナノ結晶を分散させた溶媒が化学変化すると、それによって生じる空間的な濃度の偏りに沿ってナノ結晶が自己組織化することを報告する。モデル系として、ポリオール法で合成した銀ナノワイヤーを 2-Hydroxyethyl methacrylate (HEMA) に分散させた溶液を用い、格子状にパターンしたフォトマスクを介して光照射し、HEMA を重合した。銀ナノワイヤーは PHEMA の濃度が低い領域に集合し、空間的な強度の分布に応じて集合体の大きさは変化した。また、誘起した銀ナノワイヤーの集合構造は、生成したフィルムのシート抵抗に大きく影響した。その他のナノ結晶/溶媒系においても類似の現象が生じると予想されることから、今後、本研究で得られた実験結果から、ナノ結晶を自己組織化させる普遍的な方法を開発することを目標に現在も研究を進めている。

銀ナノ結晶の合成

ポリオール法を用いて銀ナノワイヤーを合成した。この合成法では、硝酸銀、エチレングリコール、ポリビニルピロリドン在所定の濃度で溶解した混合溶液を加熱する。エチレングリコールは 140~160℃に加熱すると次のように酸化されてグリコールアルデヒドが生成し、グリコールアルデヒドによって硝酸銀が還元されると考えられている。



結晶成長の過程で、PVP は銀ナノ結晶の {100} 面に優先的に吸着し、その結果、結晶は一次元状に異方成長し、銀ナノワイヤーが生成する。本実験では、図 1 に示す平均直径と長さが 55nm と 3.5μm の銀ナノワイヤーを実験に用いた。溶媒キャストして作製した銀ナノワイヤーのフィルムのシート抵抗は、四探針法を用いて計測したところ、1.2 Ω/sq (厚み: 600nm) であった。

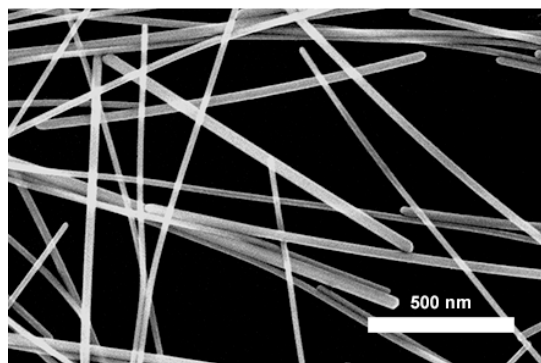


図 1 銀ナノワイヤーの FE-SEM 像

試料作成と評価

銀ナノワイヤーを分散させた HEMA に光開始剤 (Lucirin TPO) と架橋剤 (Polyethyleneglycol dimethacrylate: PEGDMA) を溶解させ、厚みがおおよそ 5μm になるようにスパーサーを用いて、PET フィルム二枚の間に溶液を充填した。また、混合系の組成は、HEMA に対して、銀ナノワイヤー、Lucirin TPO、PEGDMA がそれぞれ 8wt%、2wt%、3wt% となるように調製した。作製した試料は図 2 のフォトマスクで覆い、LED 方式の UV 照射器を用いて、405nm の紫外光を 0.1 mJ/s cm² (= mW/cm²) の強度で照射し、HEMA を重合した。試料は、共焦点レーザースキャン顕微鏡を用いて、銀ナノワイヤーからのレーザーの反射光を検出することによって、銀ナノワイヤーを可視化した。HEMA の重合によって Poly(2-hydroxyethyl methacrylate) (PHEMA) のフィルムが生成した後、紫外光が入射する面と反対側の PET フィルムを剥がし、N₂ でプラズマエッチングを行った。作製した PHEMA フィルムのシート抵抗は 4 探針法を用いて計測した。

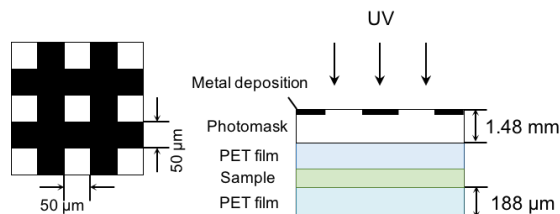


図 2 フォトマスクと試料の概略図

結果及び考察

紫外光は、光源から離れるにつれて広がるだけでなく、フォトマスクの蒸着面で回折すると考えられる。これらのことから、実際に試料に照射される光のパターン ($I(x,y)$) はフ

フォトマスクのパターンと一致しない。 $I(x,y)$ を明らかにするために、上記と同様の二枚のPET フィルムの間に、9-Anthracenecarboxylic acid (9AC) を均一に混合した厚みが $5\mu\text{m}$ のPHEMA フィルムを熱重合によって作製した。9ACは 405nm の紫外光を吸収すると二量体を形成し、9ACの蛍光が消失する(蛍光退色)。PHEMA フィルムの全面に紫外光照射して得られた9ACの蛍光強度の減衰曲線を図3に示す。なお、蛍光強度は同様の共焦点レーザーキャン顕微鏡を用いて観察した。

蛍光強度 I_F (\propto 9ACの濃度)は、試料が受けた紫外光の総エネルギー量 E (J/cm^2)が大きくなるにつれて指数関数的に減少した。 $I_F(E)$ は下のKWW式にデータをフィットし求めた。

$$I_F(E) = (1-A) + A \exp\{-E/\tau\} \quad (\text{式1})$$

$$(A = 0.91, \tau = 21, \beta = 0.78)$$

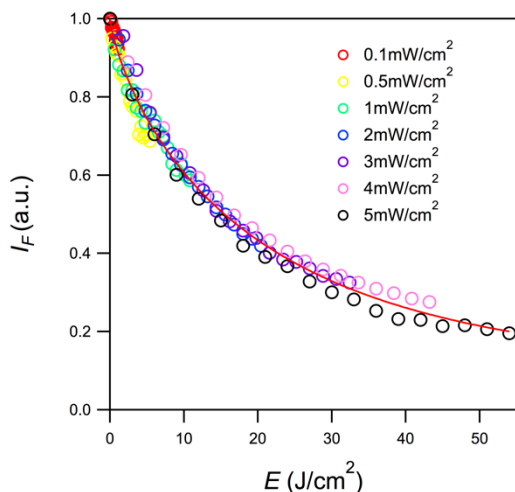


図3 蛍光強度の減衰曲線

次に同様のPHEMA フィルムにフォトマスクを介して紫外光照射し、蛍光強度の平面分布 $I_F(E(x,y))$ を観察した。蛍光画像を構成する一つ一つのピクセルに対して、式1の校正曲線を用いて、観察した I_F から E を求め、照射時間 t で割ることによって、光強度パターン $I(x,y)$ を求めた。その結果を図4(左側)に示す。フォトマスクのパターン蒸着面を光源側や試料側に設置し(フォトマスクの蒸着面を表裏に反転させ)、また、光源と試料の距離を変化させて、3つの異なる光強度パターン $I(x,y)$ を作り出した。線上の光強度分布(line profile)から、光強度が最大となる領域の幅(w_{max})と光強度がその半分になる領域の幅(w_{half})を求め、その比を光の鮮明度 Γ ($=w_{half}/w_{max}$)と定義した。 Γ は1に近づくほど、光のにじみが少なく、鮮明なパターンであることを意味している。図4a,b,c(左側)の Γ はそれぞれ、2.1, 1.8, 1.3であった。これらの光パターン照射によって得られた銀ナノワイヤーの集合構造を図4a,b,c(右側)に示す。いずれの場合においても、HEMAの重合に伴って、銀ナノワイヤーはHEMAの濃度が高い(光の強度が弱い)領域に移動することがわ

かった。銀ナノワイヤーの集合過程を調べるために、*in-situ*観察で得た銀ナノワイヤーの反射像を詳しく解析した。図5aに反射強度のヒストグラムの標準偏差 σ を照射時間に対してプロットした。一定の時間が経つと、 σ は急激に大きくなった。これは、HEMAの重合によって銀ナノワイヤーが集合し、その濃度が高い領域と低い領域の濃淡差が次第に大きくなることを意味している。また、 σ が急激に上昇するまでに誘導時間(t_0)が存在する(t_0 は図5aの交点から求めた)。HEMAなどのラジカル重合において、反応の初期では比較的緩やかな速度でモノマーが消費されるが、高分子の生成によって混合系の粘度が上昇すると、成長末端を持つ高分子の拡散が反応の律速過程になる。この過程では、成長末端同士との衝突による停止反応よりも、成長末端とモノマー間の生長反応が優勢に転じ、急激にモノマーの消費速度が高まる(自己触媒反応)。誘導期の存在は、HEMAの自己触媒反応を反映していると考えられ、フォトマスクを介した反応によって平面方向に急激にHEMAの濃度($\phi(x,y)$)に偏りが生じ、それを駆動力にして銀ナノワイヤーが移動している。言い換えると、媒質の周期的で非一様な濃度分布によって、銀ナノワイヤーの化学ポテンシャルにも同様の分布が生じ、その結果、混合系の全体の自由エネルギーが最小になる方向に銀ナノワイヤーが移動しているのではないかと考察している。この仮説の真偽については、現在も詳しく研究を進めている。

σ が急激に上昇し始める時間を銀ナノワイヤーが移動し始める時間 t_0 と定義し、銀ナノワイヤーの集合体の線幅 L の変化を調べた。その結果を図5bに示す。時間が経つにつれて、 L は小さくなり、銀ナノワイヤーの集合構造は細線化することが分かった。次式でフィッティングを行い、ナノワイヤーの移動が停止するまでの特性時間 τ と定常に達した線幅の値 L_{final} を求めた。

$$L(t) = (B \cdot L_{final}) + L_{final} \exp\{-(t-t_0)/\tau\} \quad (\text{式2})$$

(B は定数、 t は照射時間)

この結果を図5c,d,eに示す。 τ と L_{final} は、 Γ に強く依存し、照射する光パターンによって大きく銀ナノワイヤーの集合構造は変化した。 $\Gamma=1.8$ の時、 τ と L_{final} は極大値と極小値を示し(図5c,d)、また、 τ が長くなると、 L_{final} は小さくなる傾向が見られた(図5e)。照射時間が経つにつれて、HEMAは重合してPHEMAを生成し、混合系は液体から固体に変化して、銀ナノワイヤーの移動が停止する。フォトマスクを介した紫外光照射によって、モノマーの濃度勾配の形成と銀ナノワイヤーの拡散が競合し、最終的な銀ナノワイヤーの集合体が構築する。 Γ はこの競合関係を大きく変化させ、それによって銀ナノワイヤーの集合構造が変化したと考えられた。得られたフィルムのシート抵抗 R_s は、 Γ に強く依存し、

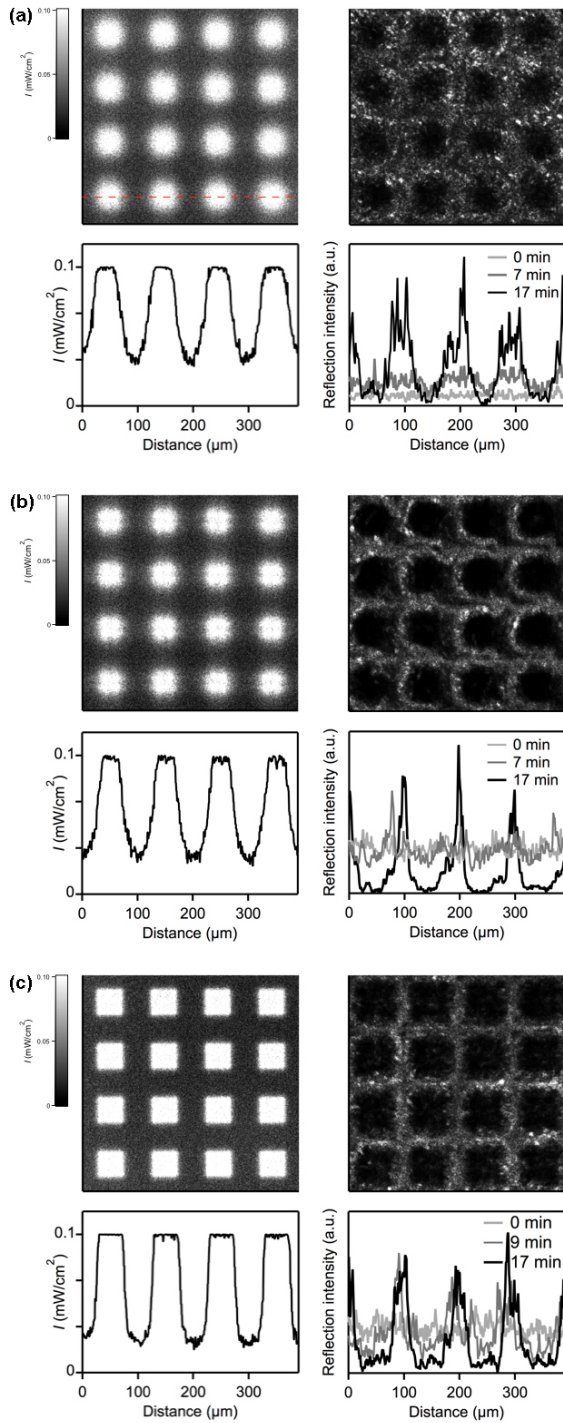


図4 試料に照射された光パターンと線上の光強度プロファイル(左側)。生成した銀ナノワイヤーの集合構造(反射像)と線上の反射強度プロファイル(右側)。(a) $\Gamma=2.1$ (b) $\Gamma=1.8$ (c) $\Gamma=1.3$

$\Gamma=2.1$ で作製した試料が最も低いシート抵抗 ($4.7 \Omega/\text{sq}$) を示した(図5f)。フィルムの透過率は、50~60%の値を示したが、系統的な変化は見られなかった。

総括

銀ナノワイヤーを分散させた HEMA に、フォトマスクを介して紫外光を照射すると、

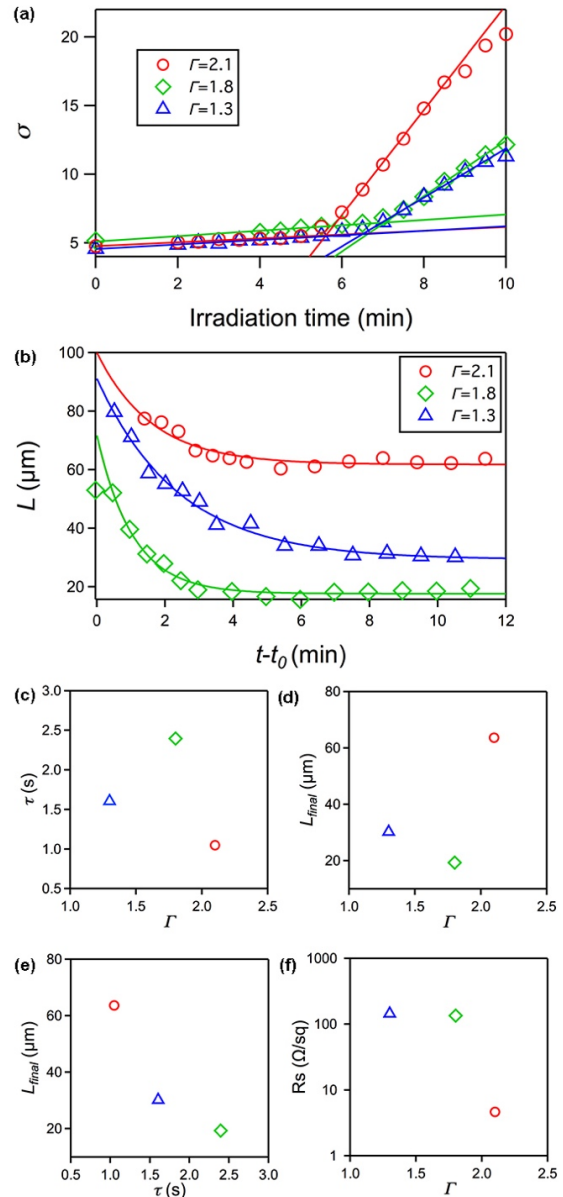


図5 (a) 銀ナノワイヤーの反射像から得た反射強度の標準偏差 σ (b) 銀ナノワイヤーの集合体の線幅 L (t は照射時間、 t_0 は(a)の交点から求めた銀ナノワイヤーが移動し始める時間を表す) (c) τ vs. Γ (d) L_{final} vs. Γ (e) L_{final} vs. Γ (f) R_s vs. Γ

生成した濃度勾配によって銀ナノワイヤーは光強度の高い領域から低い領域 (HEMA の濃度が低い領域から高い領域) に移動した。銀ナノワイヤーの集合構造は、HEMA の濃度勾配の形成と銀ナノワイヤーの拡散の競合によって現れ、照射する紫外光の強度分布 $I(x,y)$ に依存した。生成したフィルムのシート抵抗は、銀ナノワイヤーの集合構造によって変化し、最も低い試料で $4.7 \Omega/\text{sq}$ を示した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 18 件)

[1] Furubayashi, Y., Kawakubo, R., Nakanishi, H., Norisuye, T. & Tran-Cong-Miyata, Q. Effects of the positive feedback loop in polymerization on the

reaction-induced phase separation of polymer mixtures. *Chaos* 25, 064305 (2015).

[2] Kawakubo, R., Nakanishi, H., Norisuye, T. & Tran-Cong-Miyata, Q. Influence of alkyl chain length in methacrylate monomers on the phase separation induced by photo-polymerization. *Kobunshi Ronbunshu* 72, 630-641 (2015).

[3] Ochi, Y., Kawakubo, R., Van-Pham, D.-T., Kitamura, Y., Nakanishi, H., Norisuye, T. & Tran-Cong-Miyata, Q. Phase separation of polymer mixtures induced by light and heat: a comparative study by light scattering. *Adv. Nat. Sci. Nanosci. Nanotechnol.* 6, 045002 (2015).

[4] Nakanishi, H., Kikuta, I., Kawabata, Y., Norisuye, T., Tran-Cong-Miyata, Q. & Segawa, H. Fast ion and electron transport in a supercapacitor based on monolithic nanowire-array electrodes prepared from a defect-free anodic aluminum oxide mold. *Adv. Mater. Interf.* 2, 1500354 (2015).

[5] Bohner, B., Schusztar, G., Nakanishi, H., Zámbo, D., Deák, A., Horváth, D., Tóth, Á. & Lagzi, I. Self-assembly of charged nanoparticles by an autocatalytic reaction front. *Langmuir* 31, 12019 (2015).

[6] Hirose, A., Shimada, K., Hayashi, C., Nakanishi, H., Norisuye, T. & Tran-Cong-Miyata, Q. Polymer networks with bi-continuous gradient morphologies resulting from the competition between phase separation and photopolymerization. *Soft Matter* 12, 1820-1829 (2016).

[7] Tran-Cong-Miyata, Q. & Nakanishi, H. Phase separation of polymer mixtures driven by photochemical reactions: current status and perspectives. *Polym. Int.* 66, 213-222 (2017).

[8] Zámbo, D., Suzuno, K., Pothorszky, S., Bárdfalvy, D., Holló, G., Nakanishi, H., Wang, D., Ueyama, D., Deák, A. & Lagzi, I. Self-assembly of like-charged nanoparticles into Voronoi diagram. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 18, 25735-25740 (2016).

[9] Nakanishi, H., Kikuta, I., Kawabata, Y., Matsumoto, I., Naitoh, Y., Segawa, H., Norisuye, T. & Q. Tran-Cong-Miyata Nanowire electrodes for electrochemical capacitors and nanoparticles for current conduction. *ECS Transactions* 75, 11-15 (2016).

[10] Nakanishi, H., Kikuta, I., Segawa, H., Kawabata, Y., Kishida, R., Norisuye, T. & Tran-Cong-Miyata, Q. Metal-Organic Coaxial Nanowire Array Electrodes Combining Large Energy Capacity and High Rate Capability. *ChemSusChem* 10, 701-710 (2017).

[11] Van-Pham, D.-T., Nguyen, M. T., Ohdomari, K., Nakanishi, H., Norisuye, T. & Tran-Cong-Miyata, Q. Controlling the nano-deformation of polymer by a reversible photo-cross-linking reaction. *Adv. Nat. Sci. Nanosci. Nanotechnol.* 8, 025003 (2017).

[12] Kitamura, Y., Nakanishi, H., Norisuye, T. & Tran-Cong-Miyata, Q. Unidirectional bi-

continuous morphology of polymer blends undergoing photopolymerization-induced phase separation by computer-assisted irradiation (CAI) method. *Kobunshi Ronbunshu* 74, 233-238 (2017).

[13] Kameda, H., Oya, K., Nakanishi, H., Norisuye, T. & Tran-Cong-Miyata, Q. Formation of a bi-continuous morphology generated by photopolymerization in a ternary polymer blend. *Kobunshi Ronbunshu* 74, 353-259 (2017).

[14] Tóth-Szeles, E., Horváth, J., Holló, G., Szűcs, R., Nakanishi, H., Lagzi, I. Chemically coded time-programmed self-assembly. *Mol. Syst. Des. Eng.* 2, 274-282 (2017).

[15] Pandey, R. K., Kawabata, Y., Teraji, S., Norisuye, T., Tran-Cong-Miyata, Q., Soh, S. & Nakanishi, H. Metal nanowire-based hybrid electrodes exhibiting high charge/discharge rates and long-lived electrocatalysis. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 9, 36350-36357 (2017).

[16] Tóth-Szeles, E., Medveczky, Z., Holló, G., Horváth, J., Szűcs, R., Nakanishi, H. & Lagzi, I. pH mediated kinetics of assembly and disassembly of molecular and nanoscopic building blocks. *React. Kinet., Mech. Catal.* 123, 323-333 (2018).

[17] Pandey, R. K., Sun, Y., Nakanishi, H. & Soh, S. Reversible and continuously tunable control of charge of close surfaces. *J. Phys. Chem. Lett.* 8, 6142-6147 (2017).

[18] Yamashita, Y., Komori, K., Murata, T., Nakanishi, H., Norisuye, T., Yamao, T. & Tran-Cong-Miyata, Q. Conducting polymer networks synthesized by photopolymerization-induced phase separation. *Adv. Nat. Sci. Nanosci. Nanotechnol.* 9, 015009 (2018).

[学会発表] (計 5 件)

[1] Hideyuki Nakanishi, “Nanostructured Materials for Energy Storage and Transfer Applications” EMN meeting B11, Phuket, Thailand, 5/5/2015. 【招待講演】

[2] Hideyuki Nakanishi, “Determination of Binding Constants of Organic Molecules to Gold Nanoparticles and their Applications for Electrically Conductive Inks” EMN Meeting, B20, Chengdu, China, 9/23/2015. 【招待講演】

[3] Hideyuki Nakanishi, “Gold/Polypyrrole Coaxial Nanowire Electrodes for Electrochemical Energy Storage” EMN meeting, B30, Dubrovnik, Croatia, 5/6/2016. 【招待講演】

[4] Hideyuki Nakanishi, “Monolithic Nanowire Array Electrodes for Electrochemical Energy Storage” International Symposium of Materials & Asset Integrity (ISMAI2016), ISMAI-IS-011-CT, Kuala Lumpur, Malaysia, 5/18/2016. 【招待講演】

[5] Hideyuki Nakanishi, “Nanowire Electrodes for Electrochemical Capacitors and Nanoparticles for Current Conduction” PRiME2016 (Pacific Rim Meeting on Electrochemical and Solid-State Science: The joint international meeting of 230th Meeting of The Electrochemical Society, 2016 Fall Meeting of The Electrochemical Society of Japan,

and 2016 Fall Meeting of The Korean Electrochemical Society), 2197, Honolulu, USA, 10/4/2016. 【招待講演】

[6] 内藤康彬・松本郁子・中西英行・則末智久・宮田貴章「金ナノ粒子に吸着する有機分子の結合定数と粒径依存性」第64回高分子年次大会、2015年5月27日、札幌コンベンションセンター

[7] 亀田隼大・中西英行・則末智久・宮田貴章「三成分系ポリマーブレンドの重合誘起相分離に見られる収縮挙動と重合動力学的研究」第64回高分子年次大会、2015年5月28日、札幌コンベンションセンター

[8] 北村祐基・嶋田圭佑・中西英行・則末智久・宮田貴章「二成分系ポリマーブレンドの光重合相分離に及ぼす空間制限の効果」第64回高分子年次大会、2015年5月28日、札幌コンベンションセンター

[9] 川端友人・菊田郁夫・瀬川浩代・中西英行・則末智久・宮田貴章「ポリピロールを用いたコアシェルナノワイヤー電極の合成と疑似容量の速度特性」第61回高分子研究発表会(神戸)、2015年7月17日、兵庫県民会館

[10] 松本郁子・内藤康彬・中西英行・則末智久・宮田貴章「金ナノ粒子に吸着する有機分子の結合定数と導電性インクへの応用」第64回高分子討論会、2015年9月16日、東北大学 川内キャンパス

[11] 川久保利恵・中西英行・則末智久・宮田貴章「光反応誘起相分離に及ぼすメタクリレートモノマーのアルキル鎖長の影響」第64回高分子討論会、2015年9月16日、東北大学 川内キャンパス

[12] 加須栄旭・中西英行・則末智久・宮田貴章「ポリエチルアクリレート/ポリメチルメタクリレート混合系の光重合誘起相分離に及ぼす開始剤濃度の影響」第64回高分子討論会、2015年9月16日、東北大学 川内キャンパス

[13] 亀田隼大・中西英行・則末智久・宮田貴章「PMMA/PEA/PEMA ブレンドの光反応誘起相分離により発現する相構造と収縮挙動」第64回高分子討論会、2015年9月17日、東北大学 川内キャンパス

[14] 北村祐基・嶋田圭佑・中西英行・則末智久・宮田貴章「PEA/PMMA の二成分系ポリマーブレンドの光重合相分離に及ぼす空間制限の効果」第64回高分子討論会、2015年9月17日、東北大学 川内キャンパス

[15] 川端友人・中西英行・則末智久・宮田貴章「金属ナノ材料を組織化させたポリマーフィルム」第64回高分子討論会、2015年9月17日、東北大学 川内キャンパス

[16] 松本郁子・内藤康彬・中西英行・則末智久・宮田貴章「金ナノ粒子に吸着するドデカンチオールとドデシルアミンの結合定数」日本化学会第96春季大会、2016年3月24日、同志社大学 京田辺キャンパス

[17] 亀田隼大・中西英行・則末智久・宮田貴章「三成分高分子混合系の光重合誘起相分離

過程に見られる収縮に関する研究」第65回高分子年次大会、2016年5月27日、神戸国際会議場

[18] 川端友人・中西英行・則末智久・宮田貴章「銀ナノワイヤーを組織化させたポリマーブレンド膜の創製」第65回高分子年次大会、2016年5月25日、神戸国際会議場

[19] 北村祐基・中西英行・則末智久・宮田貴章「重合誘起相分離に見られる dewetting 現象の制御と異方性モルフォロジーの設計」第65回高分子年次大会、2016年5月27日、神戸国際会議場

[20] 内藤康彬・松本郁子・中西英行・則末智久・宮田貴章「金ナノ粒子における分子/金属結合の平衡反応を利用した新しい成膜法の創出」第65回高分子年次大会、2016年5月25日、神戸国際会議場

[21] 大谷顕三・山下祐希・中西英行・則末智久・宮田貴章「CAI 法で設計した三成分系ポリマーブレンドの異方性モルフォロジーとその発現機構」第65回高分子年次大会、2016年5月27日、神戸国際会議場

[22] 梯大翔・中西英行・則末智久・宮田貴章「銀ナノ粒子の表面設計」第65回高分子討論会、2016年9月14日、神奈川大学 横浜キャンパス

[23] 岸田怜子・川端友人・菊田郁夫・瀬川浩代・中西英行・則末智久・宮田貴章「有機/金属コアシェルナノワイヤー電極の電気化学エネルギー貯蔵特性」第65回高分子討論会、2016年9月14日、神奈川大学 横浜キャンパス

[24] 山下祐希・大谷顕三・中西英行・則末智久・宮田貴章「二成分系ポリマーブレンドにおける非一様なパターン照射射で誘起したモルフォロジーの形成過程に関する研究」第66回高分子討論会、2017年9月20日、愛媛大学 城北キャンパス

[25] 辻合笙悟・川端友人・中西英行・則末智久・宮田貴章「分散溶媒の化学反応によって誘起した銀ナノワイヤーの集合構造」第66回高分子討論会、2017年9月22日、愛媛大学 城北キャンパス

[26] 寺地智司・中西英行・則末智久・宮田貴章「階層的な細孔構造を有するパラジウム多孔体の電極触媒特性」

〔図書〕(計1件)

[1] Van-Pham, D.-T., Nguyen, M.-T., Nakanishi, H., Norisuye, T. & Tran-Cong-Miyata, Q., *Applications of Mach-Zehnder interferometry to studies on local deformation of polymers under photocuring in Optical Interferometry*, Banishev, A., Bhowmick, M. & Wang, J. Eds. (InTech, Croatia, 2017), Chapter 2, 25-40.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中西 英行 (Nakanishi Hideyuki)

京都工芸繊維大学 材料化学系

准教授

研究者番号：20619655