

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 5 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03576

研究課題名(和文)ホログラフィックナノコンポジットの異方性光重合相分離現象とその多彩な応用

研究課題名(英文) Anisotropic photoinduced phase transition and its applications in holographic nanocomposites

研究代表者

富田 康生 (Tomita, Yasuo)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：50242342

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：光重合性ナノ微粒子-ポリマーコンポジット(NPC)中のホログラフィック光重合によるフォトニック格子構造の形成メカニズムを理論的に解明した。また、高効率回折光学素子への応用を念頭に有機ナノ微粒子分散NPCにより高屈折率変調(>0.02)の体積ホログラフィック格子を実現するとともに、シリカナノ微粒子分散チオール・エンNPCによるコアキシャルホログラフィックデータ記録を実証した。さらに、冷・極冷中性子ビーム制御のためのナノダイヤモンド分散NPCを用いた体積ホログラフィック格子を実現した。加えて、半導体CdSe量子ドット分散NPCにおける局所場効果に起因する高次非線形光学効果の観測に成功した。

研究成果の概要(英文)：A theoretical analysis of the formation of photonic lattice structures in photopolymerizable nanoparticle-polymer composites (NPCs) under holographic exposure was conducted. In quest for highly efficient volume holographic optical elements, we found that nanocomposite volume gratings recorded in NPCs dispersed with organic nanoparticles gave the refractive index modulation amplitude larger than 0.02. We also demonstrated coaxial holographic data page storage in thiol-ene NPCs dispersed with silica nanoparticles. Also, we developed NPC volume gratings dispersed with nanodiamonds for holographic control of slow neutron beams. In addition, we successfully observed high-order optical nonlinear responses due to the local-field effect in NPCs dispersed with semiconductor CdSe quantum dots.

研究分野：光・量子エレクトロニクス

キーワード：応用光学・量子光工学 ナノ材料 複合材料・物性 量子ドット 量子ビーム

1. 研究開始当初の背景

高分子、液晶、生体などのソフトマターと呼ばれる物質群が示す豊かな物理現象は、1970年代からフランスのドゥジャンらにより研究が始められて以来、現在ではソフトマター物理学という統計物理学、凝縮系物理学、物理化学、生命科学を包含する学際的な新しい学問分野として発展している。ソフトマターは大きな内部自由度やサイズに起因するエントロピー効果と相互作用エネルギー効果の平衡によって時空間の多様なスケールで秩序構造を形成する。その秩序構造形成過程については相転移ダイナミクスやパターン形成の観点から理論的・実験的な研究が多くなされている。その中で、ナノメートルサイズの微粒子(ナノ微粒子)を高分子に分散したソフトマター系はナノ微粒子が有する大きな面積比や表面修飾分子による種々の機能化が付与出来るためナノテクノロジーとしての工学的な見地からも注目を集めている。

以上の学術的・工学的な重要性と興味から、本研究課題の代表者は2002年にフォトニクス応用のための新しいソフトマターとして光重合性ナノ微粒子-ポリマーコンポジット(NPC)を世界に先駆けて提案し、高屈折率変調の体積ホログラム記録が可能であることを実証した[Appl. Phys. Lett. **81**, 4121 (2002)]。さらに、このホログラム記録がフォトポリマー中のナノ微粒子がホログラフィック露光で配列される「ホログラフィックナノ微粒子アセンブリー」よることを世界に先駆けて実験的に示した[Opt. Lett. **30**, 839 (2005)]。これは、NPCへのホログラフィック光重合によるモノマーとナノ微粒子の化学ポテンシャル変化でそれらが方向性(異方性)を持ち相互拡散して相分離するメソスコピックスケールの異方性光重合相分離現象に起因すると考えられ、そのメカニズムを物理化学的測定と新たに開発した光学的測定手法により詳細に検証した[Opt. Lett. **31**, 1402 (2006); Appl. Phys. Lett. **88**, 011105 (2006); J. Appl. Phys. **103**, 113108 (2008)]。

応用面から見たNPCの大きな特徴は用途に応じたナノ微粒子の選択と機能化が可能なことである。以下に本研究課題の代表者が得ている主な研究成果を示す。1) 重合ポリマーとの屈折率差の大きな無機ナノ微粒子の選択で高い屈折率変調と機械的安定性を同時に得るという着想から、高性能ホログラフィック光記録材料の開発を念頭に高屈折率変調化(0.01)と低重合収縮化(0.4%)が同時に得られるNPCを世界に先駆けて開発し[Opt. Lett. **35**, 396 (2010); Opt. Mater. Express **1**, 207 (2011)]、高品位のホログラフィックデジタルデータページ多重記録(256枚)を実証した[Opt. Lett. **37**, 2250 (2012); Appl. Opt. **53**, B53 (2014)]、2) 単一ステップ形成可能な非線形フォトニック結晶の実現を目標に、半導体CdSe量子ドットを3.6 wt.% (0.9 vol.%)

の高濃度でモノマーへ分散した光重合性半導体量子ドット分散NPCを世界に先駆けて開発し、半導体量子ドットのホログラフィックアセンブリングによる高回折効率のBragg格子形成と3次・5次光非線形性の増強を実証した[Appl. Phys. Lett. **95**, 261109 (2009); Opt. Express **20**, 13457 (2012)]。3) 高感度化が可能な長波長の冷・極冷中性子ビームによる中性子干渉計の実現を念頭に、光(ボーズ粒子)と物質の電磁相互作用(電磁力)とは全く異なるナノ微粒子構成元素の原子核と中性子(フェルミ粒子)との強い相互作用(核力)を利用したホログラフィックNPC中性子光学素子を世界に先駆けて開発し、海外協力研究者と共に冷・極冷中性子ビームのハーフミラー・偏向ミラー・3ビームスプリッター動作を実証した[Phys. Rev. Lett. **105**, 123904 (2010); Phys. Rev. **A84**, 013621 (2011); Appl. Phys. Lett. **101**, 154104 (2012)]。

2. 研究の目的

本研究ではこれら研究成果をさらに発展・深化させ、以下の4つの検討項目で示すように、ソフトマター系としてのNPCの異方性光重合相分離現象の理論的解明ならびに高い材料設計自由度を持つナノコンポジット材料系としてのNPCにより物理的に全く異なる光波と物質波(中性子)の高機能な制御を高性能に実現する。

- (1) ナノ微粒子-高分子ソフトマター系における光重合に伴う異方性光重合相分離ダイナミクスと秩序形成過程の理論的解明。
- (2) ホログラフィックナノ微粒子アセンブリングによる高屈折率変調振幅(>0.01)および低重合収縮率を有する高性能なホログラフィック光記録材料および体積ホログラフィック回折光学素子の実現。
- (3) ホログラフィックナノ微粒子アセンブリングによる半導体CdSe量子ドット高濃度分散NPCの高次非線形光学応答特性の究明。
- (4) ナノダイヤモンド分散NPC体積ホログラムの実現による冷・極冷中性子ビーム用高効率偏向ミラーの実現とその冷・極冷中性子干渉計への応用。

3. 研究の方法

(1) 図1に本研究で用いたナノ微粒子アセンブリーの方法を示す。この方法は、フォトポリマーとの屈折率差の大きな無機あるいは有機ナノ微粒子を用いて、ホログラフィック露光による光

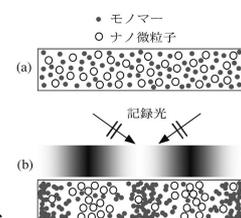


図1

重合に伴う化学ポテンシャルの変化を利用してモノマーとナノ微粒子を相互拡散させることでフォトポリマー中でのナノ微粒子のアセンブリーと高い屈折率変調振幅(Δn)を実現する。

(2) 時間依存Ginzburg-Landau方程式により、ナノコンポジット中で生じるナノ微粒子(液晶)とモノマーの異方性光重合相分離ダイナミクスと秩序形成過程を数値計算する。

(3) 実時間フーリエ変換赤外分光光度計 (FTIR) と示差走査型熱量計 (DSC) によりモノマーの光重合反応における変換率と重合速度を実時間で測定する。また、モノマーおよびポリマーの種々の波長および温度における屈折率はAbbe屈折計により測定する。

(4) 波長532nmのNd:YVO₄レーザーからの二光束平面波によりナノ微粒子-ポリマーコンポジット中に体積ホログラムを記録し、ナノ微粒子-ポリマーコンポジットに光感度の無い波長633nmのHe-Neレーザーにより体積ホログラムからの回折効率を測定し、体積ホログラム形成過程を実時間で測定する。記録された体積ホログラムの体積収縮率と熱的体積変化の測定はBragg入射角度の変化から推定する。

(5) 記録された体積ホログラム中のモフォロジーは透過型電子顕微鏡 (TEM)、蛍光顕微鏡により測定する。

(6) ピコ秒光パルスによるZ-scan法とフェムト秒光パルスを用いたポンプ-プローブ法により、半導体CdSe量子ドット高濃度分散NPC中で生じる高次非線形吸収と屈折応答について測定する。

4. 研究成果

(1) 時間依存 Ginzburg-Landau 方程式により2次元空間でのホログラフィックナノ微粒子アセンブリの相転移ダイナミクスについて数値シミュレーションを行ない、光重合に伴う相転移ダイナミクスのナノ微粒子初期濃度や相互作用パラメータ値へのナノ微粒子とポリマー密度分布のモフォロジー変化の動特性を明らかにした。図2にNPCと同様な光重合性ナノコンポジット材料としてのホログラフィック高分子分散液晶へのホログラフィック露光で生じる液晶分子の定常状態における密度空間分布の干渉縞間隔依存性の数値シミュレーション結果を示す。液晶分子の空間分布が干渉縞間隔に大きく影響を受けることがわかる。本成果は次

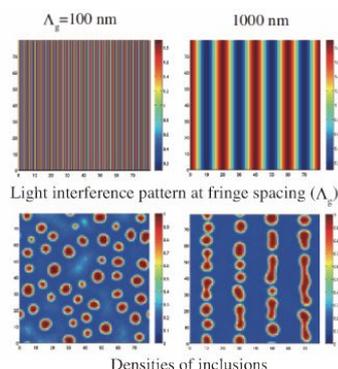


図 2

ページ記載の雑誌論文 に公表された。

(2) トリアジン骨格を持ち超高屈折率 ($n=1.82$) を有するハイパーランチポリマー (HBP) を有機ナノ微粒子として用いて、それをアクリルモノマーブレンドへ高濃度分散した NPC のホログラフィック記録特性について究明した。その結果、波長 532nm のレーザーによる二光束干渉露光で得られる格子間隔 $1\mu\text{m}$ の平面波透過型体積格子の Δn 定常値がチタノセン系光重合開始剤を用いた場合に 0.025 程度、電子供与体・受動体系光重合開始剤を用いた場合に 0.04 程度となる非常に高い値が得られることを実証した。この結果は、拡張現実 (Augmented reality: AR) や複合現実 (Mixed reality: MR) を実現するためのシースルー型ウェアラブルゴーグル・メガネに用いる体積ホログラフィック回折光学素子への応用に HBP 分散 NPC を適用ができることを示差している。本成果は次ページ起算の雑誌論文 に公表され、Optics Letters 誌においてその月に出版された全ての原著論文の中でベストな論文として Spotlight on Optics に選出された。

(3) SiO₂ ナノ微粒子を逐次重合反応を有するチオール・エンモノマーへ分散した NPC の青紫色波長 (404nm) におけるホログラフィック記録特性について究明し、記録された体積ホログラムの Δn および記録感度がホログラフィックデータ記録メディアとしての要求値を十分満足することを実証した。また、その特性評価として光重合に伴う重合収縮の時間変化をリアルタイムで光学的に高精度に測定する方法を新たに提案して、その優位性を実証した。本成果は次ページ記載の雑誌論文 と に公表された。

(4) SiO₂ ナノ微粒子を逐次重合反応を有するチオール・エンモノマーへ分散した NPC を用いた記録波長 532nm におけるコアキシャル型ホログラフィックデータ記録方式による高品位のホログラフィックデジタルデータページ多重記録 (256 枚) を実証した。また、ホログラフィック回折光学素子への応用を念頭に、低空間周波数の格子間隔でのホログラフィック記録特性について究明した。本成果は次ページ記載の雑誌論文、および に公表された。

(5) ZrO₂ ナノ微粒子をアクリルモノマーへ分散した NPC について、連鎖移動剤添加による記録された平面波透過型体積格子の空間周波数応答特性の改善について究明し、狭い格子間隔 ($< 1\mu\text{m}$) での Δn の大幅な改善とホログラム記録時の重合収縮の低減化が同時に実現できることを実証した。本成果は次ページ記載の雑誌論文 に公表された。

(6) CdSe 半導体量子ドットを 6.8vol.% の高濃度でイオン性モノマーへ一様分散したナノ微粒子-ポリマーコンポジット中に Δn が 0.01 以上の透過型体積ホログラムの記録を実現した。また、上記の CdSe 半導体量子ドット高分散 NPC を一様露光したナノコンポ

ットフィルムにおいて、マクロおよびミクロな局所場効果による高次非線形応答効果を Z-scan 法により初めて観測した。また、可飽和吸収効果と高次非線形屈折を伴う上記の CdSe 半導体量子ドット高分散 NPC に対する closed-aperture Z-scan 理論を世界に先駆けて構築した。加えて、フェムト秒光パルスを用いたポンプ-プローブ法により、上記の半導体 CdSe 量子ドット高濃度分散 NPC 中で生じる高次非線形吸収と屈折の過渡応答を測定し、Auger 効果による光励起キャリア減衰時定数の入射光パルス強度依存性を見出した。本成果は本ページ記載の雑誌論文 と に公表された。

(7) 冷・極冷中性子ビームの高効率なホログラフィック制御のためのナノダイヤモンド分散 NPC を世界に先駆けて開発して、そのホログラフィック記録特性を究明した。(その極冷中性子ビームに対する回折特性の測定は現在進行中である。) 本成果は次ページ記載の国際会議 と に公表された。

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)

R. Fernandez, S. Gallego, Y. Tomita, I. Pascual, and A. Belendez, "Diffractive and interferometric characterization of nanostructured photopolymer for sharp diffractive optical elements recording," *Polymers* **10**, 518-1-518-11 (2018), 査読有.

Y. Tomita, S. Matsushima, R. Yamagami, T. Jinzenji, S. Sakuma, X. Liu, T. Izuishi, and Q. Shen, "High-order optical nonlinearities in nanocomposite films dispersed with semiconductor quantum dots at high concentrations,"

Journal of Physics: Conference Series **867**, 012011-1-012011-5 (2017), 査読有.

J. Klepp, C. Pruner, Y. Tomita, P. Geltenbort, J. Kohlbrecht, and M. Fally, "Advancing data analysis for reflectivity measurements of holographic nanocomposite gratings,"

Journal of Physics: Conference Series **746**, 012022-1 -012022-9 (2016), 査読有.

K. Nagaya, E. Hata, and Y. Tomita, "Readout fidelity of coaxial holographic digital data page recording in nanoparticle-(thiol-ene) polymer composites,"

Japanese Journal of Applied Physics **55**, 09SB03-1 - 09SB03-4 (2016), 査読有.

Y. Tomita, H. Urano, T. Fukamizu, Y. Kametani, N. Nishimura, and K. Odoi, "Nanoparticle-polymer composite volume holographic gratings dispersed with

ultrahigh-refractive-index hyperbranched polymer as organic nanoparticles," *Optics Letters* **41**, 1281-12884 (2016), (**Selected as Spotlight on Optics in the 2016 March issues of Optics Letters**), 査読有.

Y. Fukuda and Y. Tomita, "Spatial frequency responses of anisotropic refractive index gratings formed in holographic polymer dispersed liquid crystals,"

Materials **9**, 188-1- 188-16 (2016);

doi: 10.3390/ma9030188, 査読有.

Y. Tomita, E. Hata, K. Momose, S. Takayama, X. Liu, K. Chikama, J. Klepp, C. Pruner, and M. Fally, "Photopolymerizable nanocomposite photonic materials and their holographic applications in light and neutron optics," (**invited topical review**), *Journal of Modern Optics* **63**, S1-S31 (2016), 査読有.

M. Kawana, J. Takahashi, J. Guo, and Y. Tomita, "Measurement of polymerization-shrinkage evolution during curing in photopolymer with a white-light Fabry-Pérot interferometer,"

Optics Express **23**, 15356-15364 (2015), 査読有.

J. Guo, R. Fujii, and Y. Tomita, "Volume holographic recording in nanoparticle-polymer composite doped with multifunctional chain transfer agents,"

Optical Review **22**, 832-836 (2015), 査読有.

M. Kawana, J. Takahashi, S. Yasui, and Y. Tomita, "Characterization of volume holographic recording in photopolymerizable nanoparticle-(thiol-ene) polymer composites at 404 nm,"

Journal of Applied Physics **117**, 053105-1 - 053105-6 (2015), 査読有.

[学会発表](計 42 件: 国際会議 33 件、国内会議 9 件)

(国内会議)

以下に招待講演について列記する。

富田康生、"光波と量子ビーム制御・処理のための光重合性ナノコンポジット材料," (分科内招待講演) 第 64 回応用物理学会春季学術講演会、講演予稿集、16p-422-1, (横浜パシフィコ、横浜、2017 年、3 月 16 日)。

富田康生、高山新吾、長屋航汰、百瀬啓祐、"光重合性ナノコンポジット材料を用いたホログラフィックデジタルデータ記録", (招待講演) 電子情報通信学会 磁気記録・情報ストレージ(MRIS)研究会(2016 年、12 月 8、9 日)、技術研究報告(IEICE Technical Report) 磁気記録・情報ストレージ MR2016-34、p.27-33 (2016 年、12 月 8 日)、愛媛大

学 総合情報メディアセンター メディアホール。

(国際会議)

以下に基調・招待講演および他の主な講演について列記する。

Y. Tomita, A. Kageyama, T. Aoi, Y. Iso, K. Umemoto, J. Klepp, C. Pruner, and M. Fally, “Photopolymerizable nanocomposite gratings for holographic control of slow neutron beams,” OPAL 2018, Barcelona, Spain, May 09-11 (2018); Technical Digest of OPAL 2018, 276-279, May 10 (2018).

Y. Tomita, T. Nakamura, A. F. Rizky, and R. Fujii, “Spatial frequency response of nanocomposite holographic gratings,” SPIE Photonics Europe, April 22-26, 2016, Strasbourg, France, April 22-26 (2016); Proc. SPIE **10679**, 106790U-1-106790U-8. April 25 (2018).

Y. Tomita, K. Nagaya, T. Aoi, Y. Iso, A. Kageyama, N. Nishimura, K. Odoi, K. Umemoto, J. Klepp, C. Pruner, and M. Fally, “Photopolymerizable nanoparticle-polymer composite materials for light and neutron beam manipulations,” Special Session in Advanced Optical Materials, Sensors, and Devices (AOMatSens 2018), PHOTOPTICS 2018, January 25-27, 2018, Madeira, Portugal, Proceedings, pp. 313-322, January 25 (2018).

Y. Tomita, “Photopolymerizable nanocomposite materials for holographic applications,” **(invited talk)**, III International Symposium on Nanoparticles/Nanomaterials Applications (3rd ISN²A-2018), January 22-25, 2018, Caprica, Lisbon, Portugal, Proceedings Book O 24B, p.p. 162-163, January 24 (2018).

Y. Tomita, “Photopolymerizable nanocomposite materials for light and quantum beam control and processing,” **(invited talk)**, EMN Orlando Meeting 2017, December 4-8, Orlando, USA, A21, pp.36-37, December 6 (2017).

Y. Tomita, E. Hata, T. Nakamura, K. Momose, X. Liu, S. Matsushima, J. Klepp, C. Pruner, and M. Fally, “Nanocomposite holographic gratings for light and neutron optics,” **(keynote talk)**, The 12th Japan-Finland Joint Symposium on Optics in Engineering (OIE'17), September 11-15, Sado, Japan, S1, September 12 (2017).

R. A. Rupp, M. Fally, J. Klepp, C. Pruner, Y. Tomita, and I. D. Olenik, “Perspectives for photorefractive materials in neutron physics,”

(invited talk), Photorefractive Photonics 2017, July 17-20, Qingdao, China, July 20 (2017).

Y. Tomita, S. Matsushima, R. Yamagami, T. Jinzenji, S. Sakuma, X. Liu, T. Izuishi, and Q. Shen, “High-order optical nonlinearities in nanocomposite films dispersed with semiconductor quantum dots at high concentrations,” **(invited talk)**, Photorefractive Photonics 2017, July 17-20, Qingdao, China, 012011, July 18 (2017).

Y. Tomita, R. Yamagami, T. Jinzenji, S. Sakuma, T. Izuishi, and Q. Shen, “Femtosecond dynamics of optical nonlinearities in nanocomposite films highly dispersed with semiconductor CdSe quantum dots,” Conference on Lasers and Electro-Optics Europe and 14th European Quantum Electronics Conference 2017 (CLEO/Europe-EQEC 2017), June 25-29, 2017, Munich, Germany, CE-P.18 MON, June 26 (2017).

Y. Tomita, S. Oyaizu, N. Nishimura, and K. Odoi, “Nanocomposite volume holographic gratings incorporated with ultrahigh refractive index hyperbranched polymer for diffractive optical elements,” **(invited talk)** SPIE Optics + Optoelectronics 2017, April 24-27, Prague, Czech Republic, 10233-8, April 25 (2017), Proc. SPIE **10233**, 102330A1-8 (2017).

Y. Tomita, E. Hata, K. Momose, X. Liu, J. Klepp, C. Pruner, and M. Fally, “Photopolymerizable nanocomposite materials for light and neutron optics,” 1st International Conference on Optics, Photonics and Materials (NICE OPTICS 2016), **(keynote talk)**, October 26-28, 2016, Nice, France, p.86, October 28 (2016).

J. Klepp, C. Pruner, Y. Tomita, P. Geltenbort, and M. Fally, “Observation of multi-wavelength neutron Pendellösung interference in holographic nanostructures,” **(invited talk)**, The 66th yearly meeting of the Austrian Physical Society (OEPG16), September 26-29, 2016, Vienna, Austria, 14:15-14:45. September 28 (2016).

M. Fally, J. Klepp, C. Pruner, P. Geltenbort, G. Nagy, L. Coga, M. Licen, I. Drevensek-Olenik, and Y. Tomita, “Diffractive optics for slow neutrons,” **(invited talk)**, 2016 Meeting of Austrian Neutron and Synchrotron Users (NESY), September 15-16, 2016, Graz, Austria, September 15 (2016).

Y. Tomita, “Effects of liquid crystal droplets on the spatial frequency response of a holographic polymer-dispersed liquid

crystal grating,” (invited talk), EMN Meeting Droplets 2016, May 9-13, 2016, San Sebastian, Spain, pp. 75-76, May 12 (2016).

Y. Tomita, “Holographic control of nanoparticle-distribution morphology in polymer and its applications,” (invited talk), ICSS Meeting 2015, November 4-7, 2015, Phuket, Thailand, pp. 40-41, November 4 (2015).

Y. Tomita, “High-order nonlinear optical responses of nanostructured polymer composites doped with semiconductor CdSe quantum dots at high concentration,” (invited talk), The Eleventh Japan-Finland Joint Symposium on Optics in Engineering (OIE'15), September 2-4, 2015, Joensuu, Finland, pp.100-101, September 2 (2015).

Y. Tomita, H. Urano, T. Fukamizu, and Y. Kametani, “Photopolymerizable polymer nanocomposites incorporated with hyperbranched polymer having ultrahigh index of refraction for holographic light manipulation,” SPIE Optics + Photonics 2015, August 9-13, 2015, San Diego, USA, paper 9564-27, August 13 (2015); Proc. SPIE **9564**, 95640S-1-95640S-7 (2015).

Y. Tomita, R. Yamagami, and T. Jinzenji, “Fabrication and nonlinear optical characterization of highly CdSe quantum dot dispersed polymer nanocomposites,” Conference on Lasers and Electro-Optics Europe and 13th European Quantum Electronics Conference 2015 (CLEO/Europe-EQEC 2015), June 21-25, 2015, Munich, Germany, CE-8.5 TUE, June 23 (2015).

Y. Tomita, “Photopolymerizable nanocomposite materials for photonic applications,” (invited talk), 2015 EMN Optoelectronics Meeting, April 24-27, 2015, Beijing, China, B07, pp. 59-60, April 25 (2015).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 件)

名称：中性子ビーム制御のためのナノダイヤモンドを含む感光性組成物

発明者：富田康生、吉永和夫、梅本浩一、鄭貴寛

権利者：電気通信大学、(株)ダイセル

種類：特許

番号：特願 2017-158652

出願年月日：2017 年 8 月 21 日

国内外の別：国内

取得状況(計 3 件)

名称：体積ホログラム記録材料用組成物及び体積ホログラム記録媒体

発明者：富田康生、羽田英司、大森健太郎、小島圭介、西村直也

権利者：電気通信大学、日産化学工業(株)

種類：特許

番号：特許第 5963837 号(07/08, 2016)

取得年月日：2016 年 7 月 8 日

国内外の別：国内

名称：半導体微粒子を含む体積ホログラム記録材料組成物

発明者：富田康生、大島寿朗

権利者：電気通信大学、日産化学工業(株)

種類：特許

番号：特許第 5826455 号

取得年月日：2015 年 10 月 23 日

国内外の別：国内

名称：金属ナノ微粒子-アンモニウム基含有高分子化合物複合体を含有する感光性組成物

発明者：富田康生、小島圭介、大土井啓祐

権利者：電気通信大学、日産化学工業(株)

種類：特許

番号：特許第 5729800 号

取得年月日：2015 年 4 月 13 日

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://talbot.es.uec.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

富田 康生 (TOMITA YASUO)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：50242342

(4) 研究協力者

()