

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：82401

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2010～2014

課題番号：22109006

研究課題名（和文）共振型3次元メタマテリアルの作製と機能評価

研究課題名（英文）Fabrication and characterization of three-dimensional resonant metamaterials working at visible light region

研究代表者

田中 拓男（Takuo, Tanaka）

独立行政法人理化学研究所・田中メタマテリアル研究室・准主任研究員

研究者番号：40283733

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 161,900,000円

研究成果の概要（和文）：共振型3次元メタマテリアルの実現を目指し、さまざまな加工アプローチからその可能性を検討した。フェムト秒レーザーを用いて線幅100nmの3次元金属構造を自由に加工できる技術や、DNAを用いて金ナノ粒子を結合し自己組織的にメタマテリアル共振器を作製する技術、外部磁場で金属微粒子の配列を制御する技術などを開発した。さらに、電子線描画法と金属の残留応力による自己組織化を併用して、3次元メタマテリアルを高効率に加工する手法を開発した。またブロックコポリマーや生物が持つ多様な形状をテンプレートとして利用したメタマテリアルの大量生産法や、高アスペクト比の金属ナノ構造を大面積に作製できる加工法も開発した。

研究成果の概要（英文）：In order to realize the three-dimensional resonant metamaterials, we studied and developed several fabrication techniques. We developed the novel laser fabrication technique that can create three-dimensional arbitrary metal structures with 100 nm spatial resolution. We also developed DNA templating technique and metal-particles alignment technique for self-organized formation of resonant structures of metamaterials. Moreover, using electron lithography method and residual stress of metal, we made a three-dimensional metamaterial in 4mm × 4mm area. Self-organized structures of block-co-polymer or biomaterials was used as templates for metamaterial structures. Novel fabrication technique for high aspect ratio metal nano structures, which is termed "nanocoating lithography", was also successfully developed.

研究分野：応用光学，ナノフォトニクス

 キーワード：メタマテリアル 金属ナノ構造 プラズモン DNAテンプレート ブロックコポリマー 自己組織化  
 金属マイクロコイル 擬スプリットリング構造

### 1. 研究開始当初の背景

近年、共振型メタマテリアルを光の周波数領域で動作させるための理論的基盤と、最適な金属構造の形状については明らかになってきた。現在この分野の研究者が直面している問題は、それをいかに加工するかという技術的な問題であって、主に2つの課題がある。共振型光メタマテリアルを実現するには、1) 光の波長より小さいナノスケールの金属構造を精度良く加工して、2) それらを3次元的に集積化することが必要である。

二次元のパターンだけなら光リソグラフィや電子線リソグラフィなどを利用すれば良いが、自由な形状をもつ3次元金属構造を加工できる手段は存在しない。

そもそもメタマテリアルの最も特徴的な特性は、その電磁気学的特性が物質固有の特性に留まらず、人工的に導入した形・構造が新たな特性・機能を生み出し、形を工夫することで、自然界の物質ではあり得ない特性を人工的に付加できることである。この特徴を最大限に活用するには、設計した金属ナノ構造を自在に作り出す技術が必須であり、この点を避けて通ることはできない。

もう1つの課題は、加工技術の高速度、大量生産性の問題である。メタマテリアルを作りには、高々1cm立方の中にも12~18個もの共振器を集積化しなければならない。光学素子に必要なサイズのメタマテリアルを作り出すには、ナノスケールの金属構造を大規模かつ高速に加工できる技術の開発が必要である。

### 2. 研究の目的

本計画研究では、これら2つの課題に挑戦し、金属ナノ構造で構成される光メタマテリアルを素手でハンドリングできるスケールで作製することを目指す。そしてこの目的に沿って、トップダウン的な微細加工技術に加えて、化学的合成手法と自己組織化現象を取り入れたボトムアップ型加工技術を取り込み、それぞれの分野の専門家が1つの目的を共有して研究を行うことで、ブレークスルーとなる光材料技術の開発と、その起源となる新しいサイエンスを追求する。

### 3. 研究の方法

田中は、フェムト秒極短パルスレーザーを用いたトップダウン加工法の高精度化に加え、DNAなどの生体分子や磁性微粒子に自己組織化を利用したボトムアップ的手段によってメタマテリアルの加工を試み、最終的にはトップダウン的手法とボトムアップ的手法を融合した新しいメタマテリアルの加工技術の開発を目指す。

彌田は、ブロックコポリマーにおけるマイクロ相分離を利用した自己組織化ナノ構造の作製や、光合成によって増殖する螺旋藻類スピルリナのテンプレート金属化とその次々世代通信帯域の電磁応答機能の実証を行う。

藤川は、ウェットのナノコーティングをベースとした新しいナノ加工法（ナノコーティングリソグラフィ）と分子自己組織化によって作製されたナノ構造アレイをテンプレートとしたナノ構造作製アプローチの二つによって、ナノメートルオーダーで微細加工された、貴金属ナノ構造の大面积加工とその光学特性評価を行う。

### 4. 研究成果

#### (1) 二光子還元法の高解像度化

田中は、金属錯イオンにフェムト秒レーザーを集光照射して、イオンを直接金属に還元することで、3次元的な金属構造を自由に加工できる二光子還元法を開発した。この二光子還元法における課題の1つは、レーザー照射で生成される金属結晶の成長速度が早いために結晶が過剰に成長し、その結果加工分解能が低下する事であった。そこで、金属核の過剰な成長を抑制するために、加工材料に界面活性剤を添加して、金属の結晶核が生成されると同時に界面活性剤の分子が結晶核の表面を覆うことで結晶の成長速度を制御する手法を考案した。種々の界面活性剤を網羅的に検討した結果、N-Decanoylsarcosine Sodium が特に良い特性を示す事を見出した。この界面活性剤を添加した加工材料を試したところ、波長800nmの近赤外レーザーを用いながらも線幅100nm程度にまで加工分解能を高める事に成功した。

#### (2) DNAテンプレートをを用いた自己組織化作製

メタマテリアルを構成する分割リング共振器を大量に自己組織的に作り出す手法として、DNAの自己組織構造をテンプレートとして利用する手法を考案した。実験では、DNA分子鎖が二重螺旋構造をとると三角形構造になるように人工的に設計・合成した3種類のDNA分子にそれぞれ金微粒子を結合させたものを準備した。これらを試験管の中で混合して一昼夜静置すると、3つの金ナノ微粒子が三角形の頂点に配位した構造が得られた。DNA鎖の二重螺旋は温度変化や物理的な力に弱いため、DNAテンプレートにpsoralenを添加してDNA鎖をクロスリンクさせることで構造の強度を高めることを試みた。その結果、43%の収率で大量の金属ナノ共振器を自己組織的に作製することに成功した。

#### (3) 外部磁場印加による金属ナノ微粒子の自己組織化配列

メタマテリアルの構造を動的に変化させ、必要な時にのみメタマテリアルの特性を発現できるような新しいメタマテリアル構造の形成方法を開発した。

水中にポリスチレン微粒子と金コアシェル微粒子を分散させる。これら2種類の微粒子は静磁場に対する応答特性が異なり、ポリ

スチレン微粒子は反磁性を、また金コアシェル微粒子は常磁性を示す。この微粒子の分散水溶液に外部から静磁場を印加すると、ポリスチレン微粒子の赤道面状に金コアシェル微粒子が土星の輪のように配列する現象を見出し、これを用いて金ナノ微粒子がネックレス状に配列した共振器構造が磁場の印加のみで自己組織的に形成されることを確かめた。この粒子配列は、外部から磁場を印加している間のみ起こるので、外部磁場の On-Off でメタマテリアル構造を形成したり破壊することが自由に可能になる。

#### (4) トップダウン手法とボトムアップ手法の癒合

二光子還元法のようなトップダウン的な加工技術には、加工する構造の自由度が高く、またその配列間隔や配向方向を自由かつ高精度に制御できるという利点があるが、加工に要する時間的、金銭的成本が高いという欠点がある。一方、自己組織化を利用したボトムアップ的手法では、加工コストが低く、大量の構造を高速かつ容易に加工できるという利点があるのに対し、加工できる形状には制限あり、またその加工精度にも限界があった。そこで、トップダウン的手法とボトムアップ的手法の両者を融合させて、双方の利点を活用した手法の開発を試みた。

実験では、電子ビーム描画法で単純な金属リボン構造のみを加工した後、基板上的金属リボンに残る残留応力を利用して金属リボンが自己組織的にカールして基板表面に直立する三次元メタマテリアル共振器に変形するという加工技術を開発した。実験の結果、1辺4 mm角の中に立体的なスプリットリング共振器構造が数十億個集積化した三次元メタマテリアルを加工することに成功した。試作したメタマテリアルの光学特性を評価したところ、周波数3.2 THzの中赤外領域において、屈折率0.35という真空の屈折率よりも低い屈折率を持つ物質を作ること成功した。

#### (5) バイオテンプレートを用いた加工技術

光合成によって増殖する螺旋藻類スピルリナのテンプレート金属化とその次々世代通信帯域の電磁応答機能の実証は、本計画班研究の新しい方法論のプロトタイプと位置づけられる。左巻きらせん形状の *Spirulina* は、専用培養液 SOT 培地から濾別して得た。グルタルアルデヒドを含むリン酸緩衝液に浸漬させ、表面外膜の固定化とめっき触媒核の配位サイトを付与した。金属被覆は、無電解銅めっき液(メルテックス社製)を用いて行い、表面および断面形状は SEM 観察、表面被覆金の属同定は XPS, XRD, EDX により行った。金属マイクロコイル分散試料は、溶融パラフィン(日本精蠟 PALVAX-1230)を媒体に、1, 2, 3 wt%の金属マイクロコイルを回転攪拌によって均一分散させ、1 mm 厚シートに成

型した。この等方的分散シートは、テラヘルツ時間領域分光法を用いてテラヘルツ波応答特性を評価した。*Spirulina* は、コイル直径約 30  $\mu\text{m}$ 、ピッチ約 70  $\mu\text{m}$  の左巻きらせん形状であった。無電解銅めっきによって、約 400 nm 厚の銅が被覆された銅マイクロコイルを得た。等方的シートの金属コイル含有量が増加するにつれて、0.1~2.0 THz 透過率が著しく減少し、わずか 3 wt%の含有量で 99%以上透過減衰した。

なお、本研究は、材料化学に加えて藻類培養技術と電磁波応答特性評価の共同研究によって得られた成果であり、国内外の異分野研究者との共同研究と連携に発展した。特に、電磁波応答特性評価について萩行正憲領域代表、田中拓男計画班代表との測定と解析に関するディスカッションと学生・若手研究者の交流は極めて有意義であった。また、バイオテンプレート構想の技術移転と普及をめざし、2011年に田中拓男計画班代表とバイオテンプレート研究会を設立し、講演会4回、懇話会21回(参加者のべ800名)、展示会出展9回のほか小中高生対象の体験教室や高校理科クラブとの連携において、生物、化学、物理を横断する理科教材への展開を行い、好評を得た。

#### (6) 高アスペクト比金ナノフィン構造の大面积積アレイの作製

ナノコーティングリソグラフィー法をメタマテリアルの加工に応用するため、金ナノフィンの大面积積作製を行った。従来の光リソグラフィー法で作製された矩形断面をもつラインパターンを作製し、その表面をスパッタリングによって金被覆し、次いでアルゴンガスエッチングによってライン天面およびライン間隙底面にある金被膜を選択的に除去した。さらに鋳型のリソグラフィーパターンを酸素プラズマによって除去することで、側壁に残された金薄膜を残し、幅70nm、高さ800nmという高アスペクト比をもつ金のナノフィンアレイの大面积積作製(数cm四方)の作製に成功した。田中拓男計画班代表との共同研究により、この高アスペクト比の金ナノフィンアレイが、赤外領域の光を波長選択的に吸収(トラップ)することが見出された。この現象をさらに短波長領域である近赤外・可視光領域まで拡張したところ、同様に光トラップすることが明らかとなった。(領域外研究者である、東京大学 J.-J. Delaunay 准教授チームとの共同研究成果)。また九州大学 君塚信夫研究チームとの領域外共同研究により、このトラップ光の活用を検討した。具体的には、このフィン間にトラップ光の波長領域に吸収を持つ蛍光色素を導入したところ、蛍光強度が2~3倍程度増強することが見出された。

#### (7) ブロックコポリマーリソグラフィーによる大面积積貴金属ナノ粒子集積構造の作製

微細で高度に集積化された金属ナノ構造体（共振器）を高効率かつ大面積で作製するためには、鋳型利用が有効である。このためにはナノメートルサイズの鋳型構造作製の簡便性が鍵となる。そこで、ブロックコポリマーのナノ相分離構造を2次元鋳型として、金属ナノ粒子の大面積集積構造の作製を進めた。具体的にはブロックコポリマーの分子組織化（ナノ相分離）により形成される基板垂直型のナノシリンドラーを作製し、そのシリンドラー内での貴金属ナノ粒子の直接合成を行った。その結果、直径 20nm 程度の銀微粒子が高密度に集積配列された微粒子アレイ作製し、これが高い表面増強ラマン散乱活性を示すことが明らかとなった。

またこのブロックコポリマーのナノ相分離は、サブマイクロメートルの鋳型構造内で行うと、その鋳型構造形を反映して、さらに周期的な構造を形成することが知られている。検討をさらに進めた結果、サブマイクロメートルのホールを鋳型として、ナノ相分離を行うと同心円状のナノ相分離が形成された。この同心円構造は、共振器構造として有効である。この同心円直径は、相互作用する光波長とも密接に関係するため、可視光領域でのメアマテリアル特性を実現するためには、100nm 以下程度で制御された金属ナノ構造の設計が重要である。実験の結果、直径 20nm 程度の銀ナノ粒子が直径 100nm 程度の円周上に円形配置されたナノ構造ユニットの作製に成功した。班間の共同研究（徳島大学岡本敏弘研究チーム）により、銀ナノ粒子の配置や入射光の偏光方向によって、異なる光学応答を示すことが見出された。

#### 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 36 件 全て査読あり）

1. Che-Chin Chen, Atsushi Ishikawa, Yu-Hsiang Tang, Ming-Hua Shiao, Din Ping Tsai, and Takuo Tanaka, "Uniaxial-isotropic Metamaterials by Three-dimensional Split-Ring Resonators," *Adv. Opt. Mater.* **3**, pp. 44-48 (2015). DOI: 10.1002/adom.201400316.
2. Kaori Kamata, Zhenzi Piao, Soichiro Suzuki, Takahiro Fujimori, Wataru Tajiri, Keiji Nagai, Tomokazu Iyoda, Atsushi Yamada, Toshiaki Hayakawa, Mitsuteru Ishiwara, Satoshi Horaguchi, Amha Belay, Takuo Tanaka, Keisuke Takano & Masanori Hangyo, "Spirulina-Templated Metal Microcoils with Controlled Helical Structures for THz Electromagnetic Responses", *Scientific Reports*, **4**, 1-7 (2014). DOI:10.1038/srep04919.
3. Y. Lee, E. Maeda, Y.-L. Ho, S. Fujikawa, and J.-J. Delaunay, "High sensitivity refractive index sensing with strong light confinement in high-aspect-ratio U-cavity arrays.," *Sensors Actuators, B Chem.*, **202**, pp. 137-143, (2014). DOI: 10.1088/0957-4484/23/50/505502
4. Tomo Amemiya, Shigehisa Arai, Tetsuya Mizumoto, Yuya Shoji, Takuo Tanaka, Atsushi Ishikawa, Masaaki Tanaka, and Pham Hai, "Three-dimensional Nanostructuring in YIG Ferrite with Femtosecond Laser," *Opt. Lett.* **39**, pp. 212-215 (2013). DOI: dx.doi.org/10.1364/OL.39.000212.
5. Atsushi Ishikawa and Takuo Tanaka, "Plasmon Hybridization in Graphene Metamaterials," *Appl. Phys. Lett.* **102**, 253110 (2013). DOI: 10.1063/1.4812813.
6. Ryoko Watanabe-Tamaki, Atsushi Ishikawa, and Takuo Tanaka, "Blue shift of plasmonic resonance induced by nanometer scale anisotropy of chemically synthesized gold nanospheres," *Appl. Phys. Lett.* **102**, 43110 (2013). DOI: 10.1063/1.4790291.
7. Shingo Hadano, Hiroshige Handa, Keiji Nagai, Tomokazu Iyoda, JingZe Li, and Shigeru Watanabe, "Surface-enhanced Raman Scattering (SERS) Effect of Hexagonally Arranged Gold Nanoparticle Array with 29-nm Particles and 23-nm Gaps Using Liquid-crystalline Block-copolymer Template", *Chem. Lett.* **42**, 71-73 (2013). DOI:10.1246/cl.2013.71
8. Nanae Yamashita, Hideaki Komiyama, Yongbin Zhao, Motonori Komura, Tomokazu Iyoda, and \*Keiji Nagai, "Hexagonally Arrayed 17 nm Interpenetrating and Continuous Biphasic Structure via Block-Copolymer-Templating Process", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **51**, 076704 (2012). DOI: 10.1143/JJAP.51.076704
9. E. Maeda, Y. Lee, Y. Kobayashi, A. Taino, M. Koizumi, S. Fujikawa, and J.-J. Delaunay, "Sensitivity to refractive index of high-aspect-ratio nanofins with optical vortex.," *Nanotechnology*, **23**, pp. 505502/1-6, (2012). DOI:10.1088/0957-4484/23/50/505502
10. Kanna Aoki, Kentaro Furusawa, and Takuo Tanaka, "Magnetic assembly of gold core-shell necklace resonators," *Applied Physics Letters* **100**, 181106 (2012). DOI: 10.1063/1.4706254.
11. Takuo Tanaka, "Two-photon Recording

- and Plasmon-Enhanced Read-Out of Three-Dimensional Optical Disk with Ten Recording Layers," *Jpn. J. Appl. Phys.* **50**, 902 (2011). DOI: 10.1143/JJAP.50.09MG02.
12. Kaori Kamata, Soichiro Suzuki, Masayuki Ohtsuka, Masaru Nakagawa, Tomokazu Iyoda, and Atsushi Yamada, "Fabrication of Left-Handed Metal Microcoil from Spiral Vessel of Vascular Plant", *Adv. Mater.*, **23**, 5509-5513, (2011). DOI: 10.1002/adma.201103605
  13. Takashi Yamamoto, Taro Kimura, Motonori Komura, \*Yukimitsu Suzuki, \*Tomokazu Iyoda, Sadayuki Asaoka, and Haruyuki Nakanishi, "Block Copolymer Permeable Membrane with Visualized High-Density Straight Channels of Poly(ethylene oxide)", *Adv. Funct. Mater.*, **21**, 918-926 (2011). DOI: 10.1002/adfm.201002069
  14. W. Kubo and S. Fujikawa, "Au double nanopillars with nanogap for plasmonic sensor.," *Nano Lett.*, **11**, pp. 8-15, Jan. (2011). DOI: 10.1021/nl100787b.
- [学会発表] (計 238 件)
1. Takuo Tanaka, "Three-dimensional two-photon laser fabrication for metals, polymers, and magneto-optical materials," *Photonics West 2015 (San Francisco, USA)* (2015.2.11) (2015). 招待
  2. 鎌田香織, 朴貞子, 秋本由佳, 彌田智一, "バイオテンプレート法により作製した金属マイクロコイルの構造特異的機能," 第 63 回高分子討論会, 口頭, 2014. 9. 24-26, 長崎大学 (長崎市)
  3. 込山英秋, 彌田智一, 三治敬信, "液晶性ブロックコポリマーテンプレートを用いた金ナノ構造体の超高密度集積化," 第 63 回高分子討論会, 口頭, 2014. 9. 24-26, 長崎大学 (長崎市)
  4. 鎌田香織, 田尻亘, 朴貞子, 彌田智一, "バイオテンプレート法による一方向巻き金属マイクロコイルの作製と電磁波応答特性," 第 63 回高分子学会年次大会, ポスター, 2014. 5. 28-30, 名古屋国際会議場 (名古屋市)
  5. 鎌田香織, 田尻亘, 朴貞子, 彌田智一, "バイオテンプレート法により作製した金属マイクロコイルの磁場配向制御," 第 63 回高分子学会年次大会, ポスター, 2014. 5. 28-30, 名古屋国際会議場 (名古屋市)
  6. Takuo Tanaka, Che-Chin Chen, Atsushi Ishikawa, Yu-Hsiang Tang, Ming-Hua Shiao, and Din Ping Tsai, "Isotropic metamaterials," *META2014* (Nanyang Technological University, Singapore, Singapore) (2014. 5. 22) (2014). 招待
  7. 吉瀬大亮, 森川全章, 藤川茂紀, 君塚信夫, "周期的金ナノフィンアレイの作製とその光学特性", 日本化学会第 94 春季年会, (2014. 3. 27) (名古屋)
  8. 藤川茂紀, "高アスペクト比を有する界面ナノ構造の構築と機能化", 第 14 回リング・チューブ超分子研究会シンポジウム (2014. 2. 15) (福岡) 招待
  9. 鎌田香織, 田尻亘, 朴貞子, 彌田智一, "バイオテンプレート法によって作製した磁性マイクロコイルの配向制御と THz 応答特性," 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 2014. 3. 17-20, 青山学院大 (相模原市)
  10. 田尻亘, 朴貞子, 鎌田香織, 彌田智一, 喜多あずさ, 姜俊行, 大塚邦顕, "らせん藻類由来磁性マイクロコイルの配向制御と THz 応答特性," 第 59 回高分子研究発表会 (2013/7/12) 兵庫県民会館
  11. Takuo Tanaka, "Self-organized assembly towards 3D active metamaterials," 6th International Conference on Surface Plasmon Photonics (SPP6) (Ottawa, Canada) (2013. 5. 26) (2013). 招待
  12. Shigenori Fujikawa, "Large scale fabrication of metal nanoparticles array in a confined nanospace and their crystal growth control," The International Conference on Energy and Environment-Related Nanotechnology (2012. 10. 24) (Beijing (China)) 招待
  13. 藤川茂紀, "ナノコーティングをベースとした金属ナノ構造体アレイの大面積作製とその機能化", 第 40 回東北地区高分子若手研究会夏季ゼミナール (2012. 7. 25) (仙台) 招待
  14. Takuo Tanaka, "Self-organized assembling of three-dimensional plasmonic metamaterials," The 3rd International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META'12) (Paris, France) (2012. 4. 19) (2012). 招待
  15. Takuo Tanaka, "Three-dimensional plasmonic metamaterials," International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology 2011 (Maui, Hawaii, USA) (2011. 12. 4) (2011). 招待
  16. Shigenori Fujikawa, Mari Koizumi, "Guided growth of silver nanostructures within 2D nanohole array prepared by block copolymer lithography and their plasmonic performances" *MRS Workshop Series, Directed Self-Assembly of Materials*. (2011. 10. 1) (Tennessee, USA)
  17. Wanaka Kubo, Takuo Tanaka, and

Shigenori Fujikawa, Au Double Nanopillars with Nanogap for Plasmonic Sensor, The 5th International Conference on Surface Plasmon Photonic (2011. 5. 16) (Busan, Korea)

[図書] (計 12 件)

1. 堀越智 編著, 萩行正憲, 田中拓男, 高野恵介, 上田哲也 著, “図解メタマテリアル 常識を越えた次世代材料,” 日刊工業新聞社, pp. 31-76 (2013).
2. 田中拓男, “二光子励起による金属微細加工とメタマテリアル作製への応用,” シーエムシー出版 高効率二光子吸収材料の開発と応用, pp. 154-166 (2011).
3. 藤川茂紀, “プラズモンナノ材料開発の最前線と応用”, (株) シーエムシー出版, 東京, 278 頁, 2013 年
4. 藤川茂紀, “プラズモニクス ~光・電子デバイス開発最前線~”, NTS 出版, 東京, 297 頁, 2011 年

[産業財産権]

○出願状況 (計 8 件)

1. 名称: 可視光吸収素子と、これを有する温度可視化装置および赤外線可視化装置  
発明者: 田中拓男  
権利者: 理化学研究所  
種類: 特許権  
番号: 特願 2015-31497  
出願年月日: 2015/2/20  
国内外の別: 国内
2. 名称: メタマテリアル用の単位共振器、共振器アレイおよびメタマテリアルの製造方法  
発明者: 青木画奈, 田中拓男  
権利者: 理化学研究所  
種類: 特許権  
番号: 特願 2011-131447  
出願年月日: 2011. 6. 13  
国内外の別: 国内
3. 名称: メタマテリアルの製造方法  
発明者: 彌田智一、新史紀、山下七重、鎌田香織、北岡賢治  
権利者: 東京工業大学、旭硝子(株)  
種類: 特許権  
番号: US14/336, 196  
出願年月日: 2014/7/21  
国内外の別: 国外
4. 名称: 電磁波吸収体  
発明者: 荻野哲、彌田智一、鎌田香織、田尻亘  
権利者: (株)新日本電波吸収体、東京工業大学  
種類: 特許権  
番号: 特願 2013-236267 号  
出願年月日: 2013/11/14  
国内外の別: 国内

○取得状況 (計 6 件)

5. 名称: PHOTOREDUCTION PROCESSING METHOD OF THREE-DIMENSIONAL METAL NANOSTRUCTURE  
発明者: Takuo Tanaka, Nobuyuki Takeyasu, and Satoshi Kawata  
権利者: 理化学研究所  
種類: 特許権  
番号: US 8, 372, 249  
出願年月日: 2012. 3. 7  
取得年月日: 2013. 2. 12  
国内外の別: 国外
6. 名称: 微小螺旋構造体と微小螺旋構造体を用いた電波遮蔽または吸収体  
発明者: 彌田智一、伊藤香織、山田厚  
権利者: 東京工業大学、住友金属鉱山(株)  
種類: 特許権  
番号: 特許第 5606572 号  
出願年月日: 2013/4/2  
取得年月日: 2014/9/5  
国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

バイオテンプレート研究会  
<http://biotemplate.org/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 拓男 (TANAKA, Takuo)  
理化学研究所・田中メタマテリアル研究室・  
准主任研究員  
研究者番号: 40283733

(2) 研究分担者

彌田 智一 (IYODA, Tomokazu)  
東京工業大学・フロンティア研究機構・教授  
研究者番号: 90168534

藤川 茂紀 (FUJIKAWA, Shigenori)

九州大学・カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所・准教授  
研究者番号: 60333332

(3) 連携研究者

鎌田香織 (KAMATA, Kaori)  
JST-ERATO 彌田超集積材料プロジェクト・グループリーダー (東京工業大学特任准教授)  
研究者番号: 00361791