

## 田中メタマテリアル研究室 Metamaterials Laboratory

主任研究員 田中 拓男 (工博)  
TANAKA, Takuo (Ph.D)



### キーセンテンス：

1. 光の限界を超える
2. 光を思いのままに操る
3. ナノの世界を光で観る
4. 光を閉じ込める
5. ナノスケールの3次元構造を光で作る
6. 超大容量光メモリを開発する

### キーワード：

プラズモニック・メタマテリアル, メタマテリアル, 光, 光学, 光子, フォトニクス, プラズモニクス, ナノフォトニクス, 近接場光学, 電磁気学, 自由電子, 表面プラズモン, エバネッセント場, ナノ金属共振器, レーザー, ナノファブリケーション, レーザー物理, レーザー加工, フェムト秒レーザー, 光機能デバイス, 大容量光メモリ, 3次元光メモリ, 光電変換デバイス, メタフォトニクス

### 研究概要

当研究室では、「メタマテリアル」と呼ばれるナノスケールの金属構造体で構成された人工光機能物質を研究している。従来の光学理論では、物質の光学特性は物質固有のものであり、物質が決まれば自動的に決まってしまうというのが常識であった。これは物質が決まればその物質中での光の振る舞いが一意に決定されてしまう事を意味していた。メタマテリアルは、この物質固有と考えられてきた誘電率や透磁率を、ナノ構造体を用いて人工的に制御し、全く新しい機能をもつ光学材料を作り出す技術である。このメタマテリアルを使えば、例えば、光周波数の磁場に直接応答する物質や、屈折率がゼロ、負、もしくは何百万といった巨大屈折率物質など、「あり得ない」物質を生み出すことができ、このような物質は、物質境界面で発生する光の反射を完全に除去したり、光を空間中に止めるといった全く新しい光現象を発現させる。我々は、この人工物質を活用して、光（フォトン）を自由自在に操ることができる新しいフォトニクス技術の開拓を目指している。これ以外にも、ペタバイトクラスの記録容量を持つ超大容量光メモリの開発や、ナノスケールの3次元構造を光で加工するレーザー加工技術、大規模電磁場シミュレーションソフトウェアの開発を行っている。

#### 1. アルミニウム製メタマテリアル吸収体を用いた構造発色 (Mudachathi, 田中)

一辺数百ナノメートルの正方形の MIM (Metal-Insulator-Metal) 構造で構成されるメタマテリアル吸収体を用いて、可視光全域をカバーする発色構造を作った。最先端の高速電子線ビームリソグラフィ技術を利用することで、1cm 角のサイズを持ち、肉眼でその色を観察できる発色体の試作に成功した。また、遺伝的アルゴリズムを用いた構造最適化ソフトウェアを開発し、それを用いて彩度の高い構造の最適化を行った。その結果、sRGB を超える色領域をカバーする発色体の実現可能性を示した。

#### 2. 広帯域赤外完光吸収メタマテリアル (Mudachathi, 田中)

真空蒸着法やスパッタリング法で成膜した金属薄膜に残る残留応力を使用して立体的な金属ナノ構造を自己組織的に形成できる Metal-stress driven self-holding 法を利用して、メタマテリアルを用いた赤外光吸収体の吸収効率を向上させる手法を開発した。螺旋形状を持つ三次元共振器を新たに設計し、これを試作してその光学特性を調べた結果、1つの共振器で広い波長範囲をカバーできる広帯域光吸収体の実現できることを明らかにした。

#### 3. 非対称メタマテリアル素子を用いた高感度赤外分子分光法の開発 (石川, 田中)

非対称な形状を持つメタマテリアル素子に励起されるダークプラズモンモードと有機分子との共鳴相互作用を利用して、分子の赤外吸収スペクトルを高感度に計測するデバイスの試作を行った。I字型の金ナノロッドと、L字型の金ナノ構造が近接領域に配置された IL 型共振器を作った。これに光を照射すると、I字構造に励起される局在モード表面プラズモンが L字構造のプラズモンモードを誘起して、非

放射なダークプラズモンモードを形成され光の反射が抑制される。この状態の IL 字構造に有機分子が付着すると、IL 構造と有機分子との共鳴結合により、分子の赤外吸収スペクトルに相当する波長の光が反射光として観測される。この反射光は、IL 構造によって抑制された背景光の上に生成させるので、信号光／背景光比が高くなり、結果として極微量の分子の赤外スペクトルを検出できるようになった。実験では、zeptomole (10<sup>-21</sup> mole) レベルの高感度分子検出に成功した。

#### 4. LB 膜を用いたプラズモニック・ダイマー構造の作製 (武安, 田中)

Langmuir-Blodgett 膜と呼ばれる自己組織化単分子膜を利用して、金ナノ粒子の表面の一部を選択的に疎水化することで、金ナノ粒子の 2 量体 (プラズモニック・ダイマー) を高選択的に大量に合成する手法を開発した。収率を向上させるため、LB 膜と基板との剥離性の向上を検討したところ、基板をエタノールに浸漬すると効率良く LB 膜を基板から剥離できることを見だし、これによりダイマー構造の収率を 13% 以上に高める事に成功した。また、作製した金ナノダイマーの表面プラズモン特性を暗視野顕微鏡で測定したところ、ダイマー構造に由来する表面プラズモン吸収による発色と、偏光依存性を確認した。

#### 5. GeSbTe 薄膜を用いてアクティブメタマテリアルの開発 (中村, 田中)

金属ナノ構造に励起される表面プラズモンの特性をアクティブに制御するために、金属ナノ構造を相変化材料の 1 つである GeSbTe 薄膜表面に装荷したデバイスを考案した。このデバイスに光を照射して GeSbTe 薄膜の相変化を誘起すると、その屈折率変化によって金ナノ構造の表面プラズモンの共鳴波長が変化することを確認した。

-----

#### Key Sentence :

1. Transcend conventional light theory
2. Control the light as we want
3. Observe the nano-world by the light
4. Confine the photons in the nano-scale space
5. Create nano-scale 3D structure by the light
6. Create extremely large capacity optical data storage

#### Key Word :

plasmonic metamaterials, metamaterials, light, optics, photons, photonics, plasmonics, nanophotonics, near-field optics, electromagnetics, free electrons, surface plasmon, evanescent field, nano metal resonator, laser, nano fabrication, laser physics, laser fabrication, femto-second laser, functional optical devices, large capacity optical memory, three-dimensional optical memory, photoelectric transducer, metaphotonics

#### Outline

In this research laboratory, we are intensively investigating the breakthrough science and techniques that can artificially control the electro-magnetic properties of the materials by using metal nano-structures. We collectively call these artificial materials "metamaterials". In the past, it has been believed that the electro-magnetic properties of materials such as permittivity and permeability are determined by the intrinsic property of the materials itself and no one can alter them. This suggests that the propagation of the light inside the material is uniquely determined by the material itself and it can only be controlled by modifying the shapes/structures of the materials. Metamaterial technology can control the permittivity and permeability of the materials and can create unprecedented optical materials such that it can interact directly with the magnetic components of the light, in which the refractive index can be zero, negative or tremendously giant values. These kinds of materials can create the extraordinary optical phenomena such that it can eliminate the light reflection at the materials boundary, can confine the photons in the nano-scale space. We also intensively extend the application of metamaterials to develop novel and functional photonic devices that can manipulate the photons with complete control. In addition, other active studies for the development of peta-byte optical data storage system, the development of novel laser fabrication technology of nano-scale three-dimensional structures, and the development large-scale

electro-magnetic simulation software are running concurrently.

### **1. Aluminum Metamaterial Absorber for Structural Coloration (Mudachathi, Tanaka)**

We fabricated structural coloring surface using two-dimensional periodic arrangement of Al nano square metal-insulator-metal (MIM) structure. By using cutting-edge high-speed electron beam lithography, we fabricated large size (1cm × 1cm) device whose colors can be seen by our naked eyes. The optimization of their structures using genetic algorithm was also carried out and high saturation colors exceeding sRGB region were realized.

### **2. Broadband IR Metamaterial Absorber (Mudachathi, Tanaka)**

We fabricated metamaterials absorber that consists of metal thin film, transparent dielectric spacer, and spiral shaped 3D ring resonators by the use of stress-driven self-folding method. We found that the spiral shaped metamaterial absorber had broadband absorption band in the mid-infrared region covering from 3~5 μm in wavelength.

### **3. High Sensitive IR Molecular Spectroscopy Using Asymmetric Metamaterial (Ishikawa, Tanaka)**

We developed the high sensitive IR spectroscopic platform using resonant interaction between dark mode surface plasmons excited on the metal nano structures and organic molecules. When the “IL”-shape metal nanostructures were fabricated and illuminated, the local mode surface plasmons are excited on the I-shaped structure and they induce another surface plasmon mode on the L-shaped structure. Coupling these two plasmon modes becomes dark mode plasmons, which can not couple with propagation light. Through the resonant interaction between IL-shape structure and organic molecules adhered on the surface of the structure, the light waves whose wavelength are identical to the absorption spectra of the molecules are reflected back from the device. Since this device suppresses unwanted background, weak spectral signals become detectable. Using this method, zeptomolar sensitivity was experimentally demonstrated.

### **4. Chemical Synthesis of Plasmonic Dimer Structures by Langmuir-Blodgett film (Takeyasu, Tanaka)**

We developed highly selective fabrication of gold nano-particle dimer structures using Langmuir-Blodgett film. We fabricated patchy gold nano-particles, whose surface is partially decorated with hydrophobic molecules of the LB film. When the patchy gold nano-particles were dispersed in water, the particles formed dimer structures. In order to improve the yield, we examined the optimal condition for the separation of the LB film from the substrate, and we found that the immersing the substrate into the ethanol could solve the problem. Owing to this new finding, we successfully improved the yield of plasmonic dimer structure up to 13%. The optical evaluation of the dimer structure are also carried out using dark-field spectroscopy and confirmed the coloration and its polarization dependences originated from the dimer structures.

### **5. Actively Tunable Plasmonic Structures using GeSbTe Thin Film (Nakamura, Tanaka)**

In order to tune the resonant wavelength of plasmonic structures, we introduced GeSbTe thin film, which is known as phase change material. We fabricated nano-scale gold structures on the surface of the GeSbTe thin film. By irradiating the Nd:YAG pulsed laser onto the thin film and inducing the phase transition of the film, we demonstrated that the resonant wavelength of plasmon excitation on gold nano structure could be tuned over the 15nm in wavelength.

***Principal Investigator***

田中 拓男      Takuo Tanaka

***Research Staff***

ムダチャティ レニルクマール      Renilkumar Mudachathi

***Assistant and Part-timer***

栗野 佳子      Keiko Awano

***Students***

坂本 裕輝      Yuki Sakamoto

松方 妙子      Taeko Matsukata

中村 祐希      Yuki Nakamura

池田 龍太郎      Ryutaro Ikeda

蘇 東盛      Dong-Sheng Su

***Visiting Members***

石川 篤      Atsushi Ishikawa

武安 伸幸      Nobuyuki Takeyasu

横田 幸恵      Yukie Yokota

雨宮 智宏      Tomohiro Amemiya

竹澤 晃弘      Akihiro Takezawa

陳 哲勤      Che-Chin Chen