

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

准主任研究員 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
7. 光の教科書を書きかえる

**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리케이션, 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開発している。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. THz 波～可視光周波数で動作するプラズモニック・メタマテリアルの創成 (田中, 青木, 渡邊, Fang)**

可視光領域で動作するプラズモニック・メタマテリアルの電磁気学的特性を理論解析し、メタマテリアルを構成する金属共振器アレイ構造の最適化を行った。プラズモニック・メタマテリアルの応用として、物質界面で生じる光反射を除去する光機能デバイスを提案した。2光子還元法を利用してメタマテリアル構造を作製し、試作したメタマテリアルが中赤外域に相当する 16THz の電磁波の磁場成分と直接相互作用することを実験で確認した。

また、金属ナノ粒子の自己組織化配列によるメタマテリアルや、磁性粒子を用いたメタマテリアル、異方性メタマテリアルを用いた非相反光デバイスに関する解析、実験を行った。

**2. メタマテリアルのための3次元ナノ微細金属構造の加工技術の確立 (田中, 渡邊)**

3次元金属構造を直接加工できる技術である2光子還元法の空間分解能の向上を行った。これまでの実験で、金属イオンをフェムト秒レーザーで還元して金属構造を作製する際、レーザー光の照射を止めても金属結晶が成長を続け、その結晶サイズがサブミクロンサイズにまで大きくなり、この結晶サイズが本加工法の加工分解能を決定している事が確認されていた。そこで、この不要な金属結晶の成長を阻害し、加工分解能を向上させる手段を検討した。実験では、金属結晶の成長阻害剤として加工材料に界面活性剤

(n-decanoylsarcosine sodium) を添加した。その結果、金属結晶の過剰な成長が抑制され、空間分解能が約 10 倍程度向上し、線幅約 120nm の立体金属構造が加工できるようになった。

また、block-copolymers を利用してナノパターンを自己組織的に作製する手法を、プラズモニック・メタマテリアルの構造のテンプレートに応用する手法の検討を開始した。

### 3. 3次元大容量光メモリ技術の開発(田中)

次世代大容量光ディスクの開発を目指して、10層の記録層を持つ Write-Once 型多層光ディスクを試作した。記録材料には、ローダミンB色素分子/金イオン複合材料を用いた。実験では、このディスクの各記録層に、金イオンの2光子吸収反応を利用してビット情報を記録し、これを共焦点蛍光ピックアップを用いた再生した。ダイナミックな記録・再生実験を行い、記録層間のクロストークや3次元情報記録密度、各記録層からの再生信号の強度などの特性を評価した。また、PMMA粘着フィルムをバッファ層に使用して、スピコートした記録層を交互に積層することで多層光ディスクを作製する手法を確立した。

-----

#### 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 light
6. Create extremely large capacity optical data storage
7. Rewrite the conventional textbook of optics and photonics

#### 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. Creation of plasmonic metamaterials that work from THz to visible light frequency region. (Tanaka,

Aoki, Watanabe, Fang)

Electro-magnetic properties of plasmonic metamaterials that work in the visible frequency region were theoretically investigated and the optimal structure of metal resonator which consists of this metamaterial was clarified. As an application of the metamaterial, we proposed a novel non-reflectional optical device that can eliminate the unwanted light reflections at a material interface. We developed a two-photon induced metal-ion reduction technique for fabricating three-dimensional metallic nano-structures. By using this technique, we successfully fabricated a plasmonic metamaterial that interacts directly with the magnetic component of mid-infrared waves of 16THz.

Moreover, the metamaterials structure constructed by self-organized alignment of metal nano-particles, metamaterials consisted of magnetic nano-particles, anisotropic metamaterials and their application for the non-reciprocal optical devices were intensively carried out.

## **2. Development of three-dimensional nano-scale metal fabrication techniques for 3D metamaterials.** (Tanaka, Watanabe)

We improved the spatial resolution of the two-photon reduction technique, which uses a femto-second ultra-short pulse laser as a light source. In the conventional system, even after stopping the laser irradiation, the created silver nano-crystals grow and become sub-micron size silver particles. The size of silver particles determines the final spatial resolution. We tried to decrease the size of the silver crystals down to the nanometer scale by inhibiting their growing process in order to improve the spatial resolution. We added n-decanoylsarcosine sodium that adheres to the surface of silver nucleus to terminate the silver crystal growth. From the experimental results, we successfully improved the spatial resolution of the technique down to 120 nm in line width, which exceeds the diffraction limit of the light.

We also examined to introduce the self-organized nano-structure formation technique of block-copolymers to create the templates for the plasmonic metamaterials.

## **3 . Development of three-dimensional high-capacity optical storage technology** (Tanaka)

We successfully developed multilayered optical disk system that has 10 recording layers stacked on the glass substrate. The recording material were rhodamine-B and Au(III)-ions doped PMMA material. We recorded bit-data onto the multi-layered 3D disk by using two-photon recording technique and readout them by confocal fluorescent readout technique as a fluorescent pattern of rhodamine-B. We tried dynamic recording/reading test, and examined the crosstalk between adjacent recording layers, the three-dimensional recording densities, and the signal intensity dependences to the recording layer position. We also established the fabrication technique of the multi-layered optical disks that have transparent PMMA buffer layers between recoding layers.

***Principal Investigator***

田中 拓男      Takuo Tanaka

***Research Staff***

青木 画奈      Kanna Aoki

渡邊 亮子      Ryoko Watanabe

Xu Fang

***Students***

Zheng Gaige

***Visiting Members***

島崎勝輔      Katsusuke Shimazaki

Shyh-Shii Pai