



# プラズモニック・メタマテリアルの創製と新奇光デバイスへの展開

あり得ない光学材料を作り出す

## 田中 拓男

独立行政法人理化学研究所 河田ナノフォトニクス研究室

〒351-0198 埼玉県和光市広沢2-1

Tel: 048-467-9341

Fax: 048-467-9170

e-mail: t-tanaka@riken.jp

### 研究の背景

光技術とは光を操ることで様々な工学機能を実現する技術であるが、光の操作とは結局は3次元空間中に屈折率の分布を作り出す操作である。例えば光を集めるレンズも、空間中に何もなければ光はただ直進するだけであり、この空間に中央が膨らんだ形状の屈折率の分布、つまり凸レンズを配置するからこそ光の進行方向が曲げられて光が集光される。ミラーもプリズムも光ファイバーも全て同じである。光を自在に操ることが光技術の究極の目標であるとするれば、それは空間中にどれだけ自由自在に様々な値の屈折率分布を作り出せるかに懸かっている。ところが我々が住むこの自然界に存在する物質の屈折率はそんなにバラエティ豊かではない。物質の屈折率( $n$ )は、電磁気学的には比誘電率( $\epsilon_r$ )と比透磁率( $\mu_r$ )という2つの物理量によって定義される。ところが光の周波数ではほとんどの物質は磁性を失い、 $\mu_r$ は1.0に固定される。つまり物質の $n$ は $\epsilon_r$ のみの違いであってその自由度は極めて制限されている。この制限を打ち破って物質に人工的な磁性を与えて光領域における物質のバラエティを飛躍的に高めようとする試みが本研究の主題であるプラズモニック・メタマテリアルである。

### メタマテリアルの設計

人工的な磁性を生み出す原理は中学校で習う電磁誘導が基本である。円環状の導体(コイル)に交流磁界を印可するとコイルには環状の誘導電流が流れて、自らが磁束の変化を打ち消すような磁石になる。環状電流を流す機構があれば、非磁性の物質にも磁性が生まれる。そこでこのような磁性を生み出す機構を光の波長より小さなサイズで作成し、これをホストとなる材料中に無数に集積化すれば、巨視的には光に対して磁性を持つ材料ができる。これは物質の透磁率を人工的に制御したことに対応する。実際には、金属リングの一部に切れ目を設けてキャパシタンス成分を導入したLC共振器回路として設計する。我々はこの共振

器を用いたメタマテリアル構造において、可視光周波数にまで動作帯域を高めることが可能であることを理論的に明らかにし、その設計方法を確立した。具体的には銀もしくは金を図1に示すような直径数百nmのナノリングに加工し、これにギャップ間隔10nm程度のスリットを設けたものを無数に集積化することで、可視光全体をカバーする広い周波数領域で人工的な磁性を発現できることを明らかにした[1,2]。

### 新奇光機能デバイス

光の磁場に対して応答する物質があれば、これまでの光学理論の範疇では説明できない新たな光学現象を発現させることができる。その一例がs偏光に対するブリュースターである。ブリュースターは物質境界面

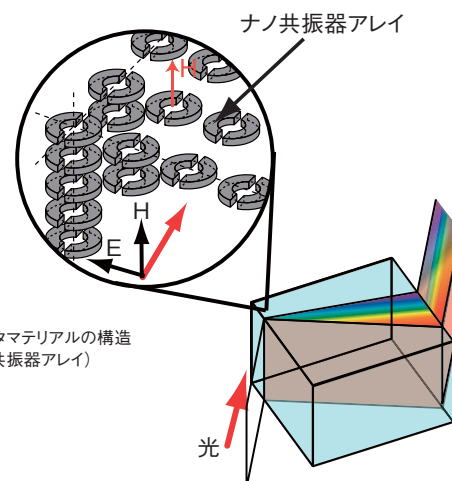
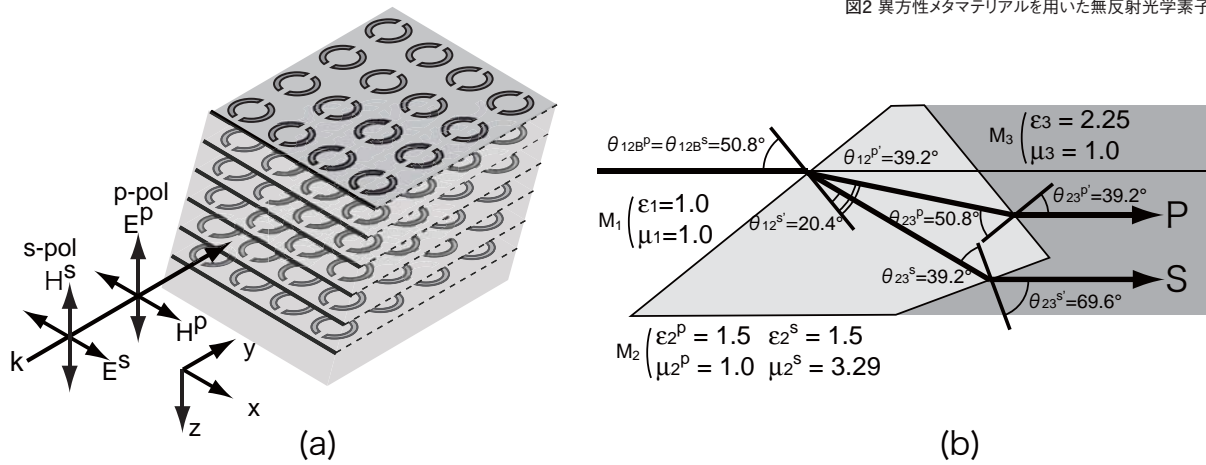


図1 プラズモニック・メタマテリアルの構造 (3次元金属ナノ共振器アレイ)

図2 異方性メタマテリアルを用いた無反射光学素子



での光の反射がゼロになる現象として知られるが、どの光学の教科書にもブリュースターはp偏光に対してのみ発現すると記述されている。しかし我々はこのブリュースターの偏光依存性の起源が、物質の屈折率の違いが誘電率の違いのみに起因するという電場と磁場に対する非対称性にあることを指摘し、透磁率を制御した物質の存在下ではこの前提は成り立たずs偏光に対するブリュースターが発現する事を見出した。さらに異方性メタマテリアルというアイデアを導入することで、どんな偏光の光に対しても常にブリュースターを発現させる光機能素子を考案した。図2はその一例である。このメタマテリアルを空気とガラスの境界面に挿入することで、光の偏光状態に依存することなく、空気とガラスの境界面の反射を

なくして100%の効率で光を透過させることが可能となる[3]。

### 2光子還元法

メタマテリアルを作るには、3次元のナノ金属構造体を加工する必要がある。しかしこの「3次元」という要求は今日の微細加工技術にとっても困難な要求である。そこでフェムト秒レーザーを金属の錯イオンを含む材料中にサブミクロンサイズに集光照射して、レーザースポット部において局所的に金属イオンを還元することで自由な形状を持つ金属構造体を自在に生成する技術を開発した。図3(a)は作製したメタマテリアル構造の一例である。また図(b)、(c)はサブミクロンサイズの3次元銀構造で、ガラス基板上に自立している。この加工法を使えば

このような完全な3次元金属構造を加工することができる[4, 5]。

### 今後の展望

本稿で紹介したメタマテリアルは、ナノサイズの3次元金属構造体を用いて物質の電磁気学的な特性を人工的に操作する技術である。これは物質の形や構造がその物質の特性を決めるという全く新しい概念を提供するものである。これを使えば、光の周波数の磁場に応答する物質など、材料物性の常識では「あり得ない」物質を作り出すことができる。光学の常識もしくは材料合成の常識を覆すかもしれないこの分野の研究をこれからも継続して推進してゆく所存である。

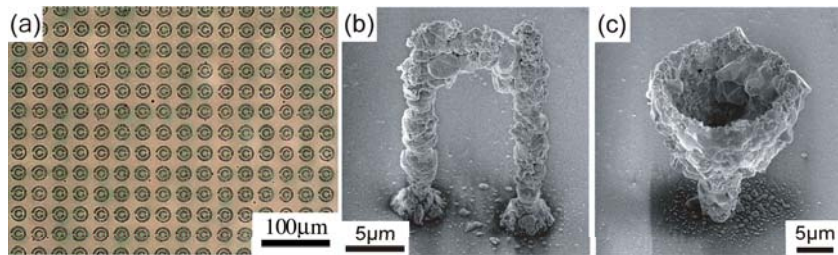


図3 2光子還元法で作成した金属構造

### References (参考文献)

- [1] A. Ishikawa, T. Tanaka, and S. Kawata: Phys. Rev. Lett. 95(2005)237401
- [2] A. Ishikawa, T. Tanaka and S. Kawata: J. Opt. Soc. Am. B 24(2007)510
- [3] T. Tanaka, A. Ishikawa, and S. Kawata: Phys. Rev. B 73(2006)125423
- [4] T. Tanaka, A. Ishikawa, and S. Kawata: Appl. Phys. Lett. 88(2006)81107
- [5] A. Ishikawa, T. Tanaka, and S. Kawata: Appl. Phys. Lett. 89(2006)113102