

## 「プラズモニック・メタマテリアル」

(独) 理化学研究所 田中メタマテリアル研究室

(独) 科学技術振興機構 さきがけ

田中 拓男

## Plasmonic Metamaterials

Takuo Tanaka

RIKEN Advanced Research Institute, Metamaterials Laboratory, JST PRESTO

光の波長より小さなナノサイズの金属共振器をホストとなる物質中に無数に集積化すると、このナノ構造を有する物体はあたかも均質な物質として振る舞う。この金属ナノ構造体でできた疑似物質には、その物質の光学特性を埋め込んだ金属の構造(形)によって制御できるという特徴がある。そして、その構造をうまく設計すれば、自然界では「あり得ない」特異な光学特性を人工的に生み出すことが可能となる。このような人工光学物質がプラズモニック・メタマテリアル(以下メタマテリアル)である。新奇な光学特性を人工的に付加したメタマテリアルは、全く新しい光学現象を生み出してくれる。本稿では、このメタマテリアルの動作原理とその応用技術を紹介する。

## 人工磁性材料への応用

〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1

TEL 048-467-9341

FAX 048-467-9441

E-mail: t-tanaka@riken.jp

物質の光学特性を記述する物理量の中で最も代表的なのは屈折率  $n$  である。この屈折率は、比誘電率  $\epsilon_r$  と比透磁率  $\mu_r$  という2つのパラメータで構成されていて、

$$n = \sqrt{\epsilon_r \times \mu_r} \quad (1)$$

で与えられる。しかし、可視光のような高い周波数領域では、物質は光の磁場成分と相互作用できず、全ての物質の  $\mu_r$  の値は1.0に固定される。すなわち、式(1)の  $\mu_r$  の項は省略され、屈折率は比誘電率  $\epsilon_r$  だけで決定されるというのが光学における常識である。

メタマテリアルを使えばこの常識を覆し、物質の  $\mu_r$  を人工的に変化させることができる。 $\mu_r$  を1.0から変化させるということは、光の周波数で変化する磁場に応答できる人工的な「磁性」を物質に与えることを意味するが、そのためには磁性を生み出すカラクリが必要である。メタマテリアルでは、金属をリング状に加工して、磁性の起源の1つである原子核中の電子の軌道運動を模倣することでこれを実現する。

この金属リングに外部から光を照射して磁場

を印加すると、電磁誘導の原理で金属リング内に電流が流れて（自由電子が振動して）新たな磁場が生成される。さらに、金属リングに適当な切れ目を入れると、これがコンデンサーとして働いて金属リング全体がLC共振回路となり、その共振周波数の光と強い共鳴相互作用を起こす。このような共振素子を光の波長より小さなサイズで設計して、ホストとなる物質中に3次元的に集積化すると、共振器アレイ全体が光の磁場成分と相互作用する新しい物質として機能してその巨視的な比透磁率が1.0から変化（図1）。

このような金属共振器を用いたメタマテリアルの原理は、1999年にPendryが提案し、2000年にSmithが4GHzのマイクロ波領域において実験的に示した<sup>1,2)</sup>。彼らが提案した共振器はSplit Ring Resonator (SRR) と呼ばれる、同心円状に複数のリングが配置されたものである。

詳細は省略するが、我々は金属の分散特性を考慮しながらメタマテリアルが生み出す実効的な透磁率変化を計算した。その結果、銀を用いた単一リング型共振器アレイが最も大きな $\mu_r$ の変化を生み出し、可視光領域全域を含み紫外

プラズモニック・メタマテリアル

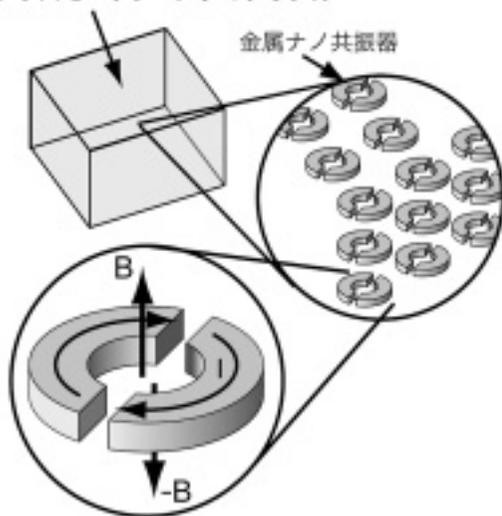


図1 プラズモニック・メタマテリアル

光に至る広い周波数範囲で2.0以上の透磁率変化が実現できる事を理論的に示した<sup>3,4,5)</sup>

### メタマテリアルの無反射光学素子への応用

ある物質から屈折率の異なる他の物質に光が入射すると、その境界面で光の一部が反射される。この光の反射は避けることができないが、光の偏光をp偏光に設定して入射角をある特定の角度に合わせると、反射光がゼロになる現象が起こる。これがブリュースター現象で、その入射角をブリュースター角と呼ぶ。ブリュースター現象がp偏光でしか起こらないという事実は、どの光学の教科書にも載っている光学の常識の1つである。しかし我々は、物質の $\mu_r$ が1.0から変化した物質の境界面では、s偏光にもブリュースターが発現することを見出した。そして、メタマテリアルを使って $\mu_r$ を操作した物質を作り、その界面で発生するp偏光とs偏光のブリュースター現象を使って物質界面における光の反射を偏光状態に関係なく抑制できる素子を考案した<sup>6)</sup>。この無反射光学素子の設計例として、光が真空中からガラスへ伝搬する状態を仮定し、その境界面にメタマテリアルを

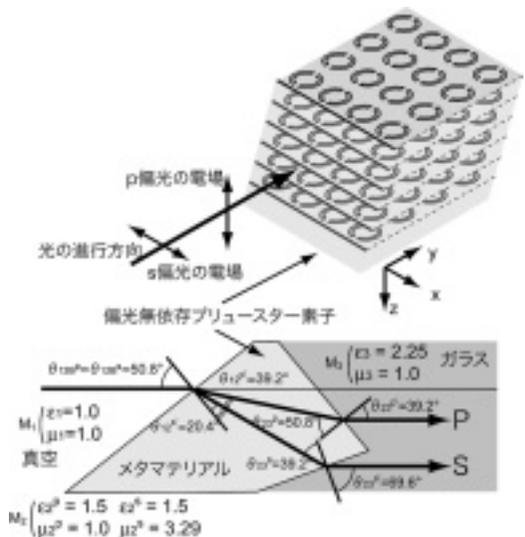


図2 p, s偏光ブリュースター現象を用いた無反射光学素子

挿入したモデルを示す (図2)。真空から入射した光は、一旦メタマテリアルの境界面で  $p$ ,  $s$  それぞれの偏光に応じてわずかに異なる方向へ屈折した後、ガラスの境界面で再度屈折して  $p$ ,  $s$  両偏光が同じ出射角でガラス中へと透過する。境界面での光の反射率は、いずれの偏光に対しても  $2 \times 10^{-5}$  以下であり、界面での光の反射は 100% 無効化されていることが確認できた。このような無反射光素子を光ファイバーの先端に取り付ければ、光の偏光状態に関係なく、反射ロスなく光ファイバーに光をカップリングさせることができ、光の伝送効率を大幅に向上させることが可能となる。

### メタマテリアルを用いた高屈折率物質

透磁率を制御できるメタマテリアルを用いれば、高い屈折率や低い屈折率を持つ物質をより自在に作り出すことができる。屈折率の高い物質は、薄くて軽いレンズの実現に有効でありその要望も大きい。

例えば、メガネなどのプラスチックレンズに利用されている樹脂では、現在では屈折率が高いものでも 1.76 程度である。この屈折率を 1.80 に上げようとする、 $\epsilon_r$  に換算してその値を 0.14 も上げなければならず、これは容易ではない。しかし、1.80 と 1.76 の比は 1.023 しかない、これを  $\mu_r$  の変化で賄うなら、 $\sqrt{\mu}$  を考慮して、もともと 1.0 である  $\mu_r$  をわ

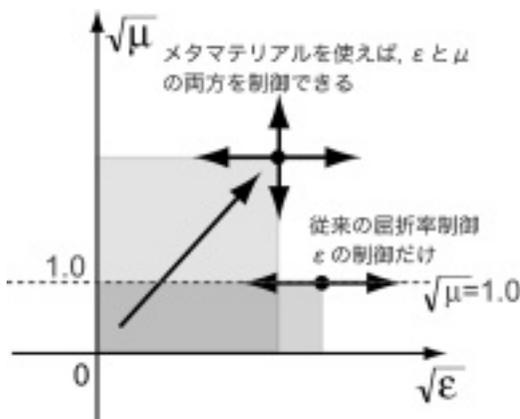


図3 メタマテリアルを用いた新しい屈折率制御技術

ずか 0.046 だけ上げるだけで済む。図3に示すように、メタマテリアルを用いた透磁率制御を利用すると、これまで  $\epsilon_r$  だけに縛られていた屈折率制御の自由度を  $\epsilon_r$  と  $\mu_r$  の両方に拡張することができ、物質の屈折率を大幅に変化させることができる。もちろんこの技術は、ガラスにも適用することが可能であり、従来では考えられない光学特性をもった新しいガラスを生み出すことも可能である。

### 全く新しい光技術—メタフォトンクス

物質の透磁率を操作可能にし、物質に人工的な磁性を与えることができるメタマテリアルは、自然界の物質の光学特性を大幅に拡張して、これまで存在しなかった物質を光学の世界に導入する。そしてこのような物質は、これまでの光学理論では考えられない光学現象を生み出すポテンシャルを持つ。メタマテリアルが自由に手に入るようになれば、光学に大きなパラダイムシフトが起こり、これまでの光学を超越した新しい光技術が生まれる。「メタフォトンクス」の誕生である。このメタフォトンクス世界には我々がまだ知らない光機能や光学現象などがたくさんあるはずである。メタマテリアルの実現を目指した研究と平行して、これらを 1 つ 1 つ探して行きたい。

### 参考文献

- 1) J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, and W. J. Stewart: IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 47, 2075 (1999).
- 2) D. R. Smith, W. J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser, and S. Schultz: Phys. Rev. Lett. 84, 41847 (2000).
- 3) A. Ishikawa and T. Tanaka, Opt. Commun. 258, 300 (2006).
- 4) A. Ishikawa, T. Tanaka, and S. Kawata: Phys. Rev. Lett. 95, 237401 (2005).
- 5) A. Ishikawa, T. Tanaka and S. Kawata: J. Opt. Soc. Am. B 24, 510 (2007).
- 6) T. Tanaka, A. Ishikawa, and S. Kawata, Phys. Rev. B 73, 125423 (2006).