

# プラズモニック・メタマテリアルの新奇光学素子への応用

田中拓男<sup>1,2)</sup>, 河田聡<sup>1,3)</sup>

<sup>1)</sup>理化学研究所, <sup>2)</sup>JST さきがけ, <sup>3)</sup>大阪大学大学院工学研究科

空間を光が伝搬する際、その伝搬方向を決めるのは、空間に広がる屈折率の分布である。物質の屈折率( $n$ )は、その物質の持つ比誘電率(以下誘電率もしくは $\epsilon$ )と比透磁率(以下透磁率もしくは $\mu$ )によって決められる。これら $\epsilon$ 、 $\mu$ はそれぞれ電場、磁場に対する物質の相互作用を記述する物理量である。つまり光の伝搬は、光波の電場、磁場それぞれと物質との相互作用によって決定される。しかし実際には、自然界に存在するほぼすべての物質は光波の磁場成分とは相互作用しない。物質の磁性は電子や原子のもつスピンや軌道運動に起因するが、これらは光の周波数(可視光だと数百 THz)に追従することができないからである。この事は、物質の $\mu$ がどの物質においても 1.0 であることに対応する。一方物質の電場に対する応答は物質中の電荷の振動によって発現するものであり、これは光の周波数に十分に追従でき、物質の $\epsilon$ は物質の種類や光波の周波数に応じて様々な値に変化する。つまり、屈折率 $n$ は本来 $\epsilon$ と $\mu$ の2つで決まるが、実は $\epsilon$ のみの変化に支配されている。そこで、この物質の磁場に対する相互作用を人工的に発現させ、屈折率を $\epsilon$ と $\mu$ の2つのパラメータによって制御するという研究が最近注目を集めている。もちろん電子や原子のスピンの応答速度を高めることは不可能なので、磁気的な相互作用を発現させるためにも、電荷(特に自由電子)の振動を利用する。具体的には、金属のような自由電子を含む材料を用いて、光波の波長より小さなナノメートルサイズの磁気共振器を作り、これをホストとなる材料中に3次元的にアレイ状に作り込む。この材料に光波を照射すると、個々の磁気共振器が光の磁場成分と共振してマクロスコピックな物質の磁気的特性を変化させ、物質の実効的な $\mu$ が変化する。また $\epsilon$ についても、 $\mu$ と同様に電気共振器を物質中に組み込めば、本来物質毎に決まっていた $\epsilon$ を人工的に操作できるようになる。このような人工物質は、「プラズモニック・メタマテリアル」(以下メタマテリアル)と呼ばれている。この技術を用いると、これまで物質固有と考えられていた $\epsilon$ や $\mu$ を自在に操作できるようになる。特に 1.0 以外の透磁率を持つ物質は自然界に存在しないので、これまで人類が手にしたことのない物質を創造できる可能性がある。そして、このような新物質は同時に従来にない光学現象を発現させる。我々は早くからこの光学領域におけるメタマテリアルの潜在能力に着目し、まず光学領域において $\epsilon$ や $\mu$ を制御できるかの検証と、そのために最適な金属材料選択やその構造の最適化を検討した。

図1は、Split-Ring Resonator(SRR)と呼ばれる共振器構造である。我々はこの共振器構造について、その材質ならびに共振器の形を変化させて、実効的な透磁率の変化量を求めた[1]。図2は、300,500,700THzにおいてそれぞれ最適化させたSRR構造について、その共振周波数付近の透磁率の変化の様子をプロットしたものである。また、図3は、実現できる最小の透磁率の値を周波数を横軸にプロットしたものである。図2に示すように、共振器の共振周波数の前後において、透磁率の値が大きく変化し、初期値 1.0 を中心として共振周波数の低周波数側では+側に、また高周波数側では-側に透磁率に変化していることがわかる。また、図3の結果から、銀でつくったSRRでは、可視域全体をカバーし紫外域まで伸びる広い周波数領域において、マイナスの値まで $\mu$ の値を変化させることが可能であることがわかった。このように、光周波数領域においてもナノメートルサイズの磁気共振器アレイを物質中に組み込むことにより、透磁率を人工的に制御できることを電磁気学的な

解析により確認した。

これまで 1.0 に固定されていた物質の誘電率を人工的に変化させることができると、従来の光学では不可能とされていた物理現象を発現させることが可能となる。その一つが s 偏光の光に対する Brewster の発現である。屈折率の異なる物質の境界面に光が入射するとき、その境界面において光の反射が生じる。ところが、光をある特定の角度で入射させると、境界面で生じる反射波が消え、すべての光エネルギーが境界面を通過して伝搬するという現象が知られており、この特別な入射角は Brewster 角と呼ばれている。この現象は、レーザー共振器の窓材など光の反射を嫌う場所に利用されている。ところがこの現象を発現させるには、入射角を Brewster 角に設定すると同時にもう一つ、光の偏光方向が境界面に対して p 偏光で入射しなければならないという条件が加わる。つまり Brewster は p 偏光の光のみで観測される現象で、s 偏光の光では発現しないので、この現象を利用した光学素子は強い偏光依存性を持つ。

Brewster が p 偏光でのみ発現するのは、物質境界面において誘電率の値が変化するのにに対し、 $\mu$  の値は常に 1.0 で変化しないことが原因である。つまりもしメタマテリアル技術を用いて物質の透磁率を物質境界面の前後で変化させることができれば s 偏光においても Brewster 角をつくりだすことができる。ただ p 偏光における Brewster と s 偏光における Brewster は互いに排他的であり、均質かつ等方的な物質では両者を同時に発現させることは不可能である。そこで、我々は異方性メタマテリアルという概念を導入して、p、s 偏光それぞれに対して独立に物質の  $\epsilon$ 、 $\mu$  を制御することで、p、s 両偏光に対して同時に Brewster を発現させる手法を考案した[2]。図 4 にその構造を示す。このように、ある平面内にのみナノサイズの共振器構造を配列されたメタマテリアルを作り、p 偏光に対しては従来の Brewster を、s 偏光に対しては境界面前後で  $\mu$  を変化させて Brewster を発現させると、光の偏光方向によらずに境界面での光の反射を除去する光学素子が実現できる。図 5 は、真空中からガラスに光が入射する際、その境界面での光の反射を無効化させる異方性メタマテリアルの設計例である。例えばこのような素子を光ファイバーの端面に形成することにより、反射ロスなく光を光ファイバーにカップリングさせることができるようになる。

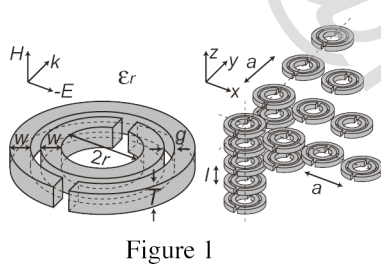


Figure 1

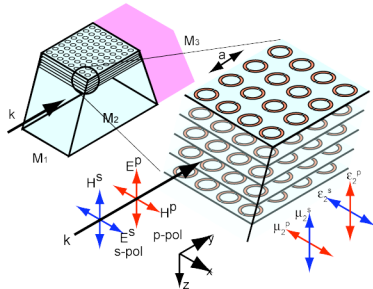


Figure 4

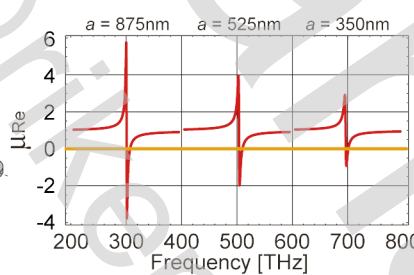


Figure 2

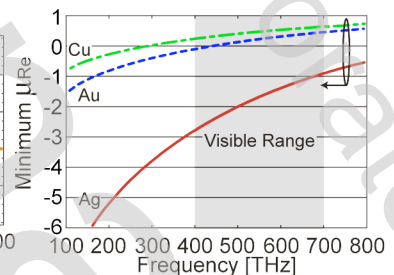


Figure 3

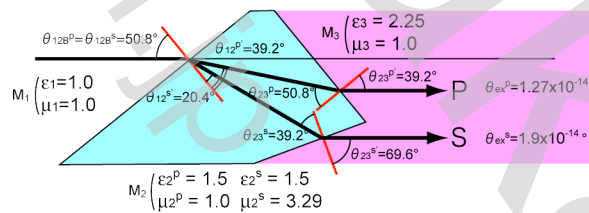


Figure 5

- [1] A. Ishikawa, T. Tanaka, and S. Kawata, Phys. Rev. Lett. **95**, 237401 (2005).  
 [2] T. Tanaka, A. Ishikawa, and S. Kawata, Phys. Rev. B **73**, 125423 (2006)