



バルクから表面へ向かうメタマテリアル

大阪大学 大学院工学研究科
高原淳一

1. はじめに

メタマテリアル (metamaterial) はありふれた材料から、負屈折率 (Negative Refractive Index: NRI) をはじめとする新しい光学特性や機能を作り出せる可能性をひめた「光学材料」として期待されている¹⁾。光学材料の代表例といえば光学ガラスであろう。光学ガラスは一定の屈折率と均一で無色透明な光学特性をもち、分散も小さいという光学材料として理想的なものである²⁾。一方、メタマテリアルは光学ガラスと比較すると、損失、分散、異方性が極めて大きく、理想的な光学材料からはほど遠いのが現状である。NRIの研究も最近はほとんど見かけなくなった。

それではこの分野が衰退しているかというとなんかそうではなく、世界的に活発な研究活動が行われている。ただし、研究の中心はメタマテリアルが当初に目指していたような有効媒質としてのバルク光学材料の実現からは離れ、2次元のメタマテリアルであるメタ表面、メタサーフェス (metasurface) による平面光学素子へシフトしている。最近では損失を極めて小さくおさえた誘電体メタサーフェスとそれによるメタレンズが大きな注目を集めている。バルクメタマテリアルではハイパボリック・メタマテリアル (Hyperbolic Metamaterial: HMM) は現在でも盛んに研究されている。

メタマテリアルといえば NRI ばかりが注目されてきたが、それ以外にも多くの魅力的な機能を実現できる。本稿でははじめに、メタマテリアルの有効媒質としての屈折率の制御について述べ、紹介される機会は少ないがユニークな光学特性をもつ HMM について紹介する。次に、シリコン誘電体メタサーフェスについて当研究室ですすめている構造色への応用を紹介する。誘電体メタサーフェスではミラー共振器中の多重極子が重要な役割を果たす。

2. メタマテリアルによる有効屈折率の制御

図1に示すようにメタマテリアルは光の真空波長 (λ_0) より十分小さな構造をもつメタ原子 (meta-atom) とよばれる人工的な光共振器を多数配列した光学的な有効媒質 (effective medium) のことである (音響メタマテリアルなども提案されているが、ここでは光のメタマテリアルのみを考える)。有効媒質とはメタ原子のサイズや周期が λ_0 より十分に小さい場合に平均化されてしまい、媒質を均一な屈折率 (有効屈折率 n_{eff}) として扱えるという意味である。メタ原子の配列は周期的でもランダムであっても良い。もちろん、メタ原子自体は原子 (atom) が配列した物質 (material) からできているので、原子の種類と配置によって物質の光に対する応答が決まるのと同様に、メタ原子の構造と配置によりメタマテリアルの有効媒質としての n_{eff} が決まる。

物質の屈折率 n と誘電率 ϵ 、透磁率 μ の間には以下の関係式がある。

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

ここで $\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0$ は比誘電率、 $\mu_r = \mu / \mu_0$ は比透磁率、 ϵ_0 と μ_0 はそれぞれ真空の誘電率、透磁率である。光