

メタマテリアルとメタサーフェスとメタレンズ

国立研究開発法人理化学研究所 光量子工学研究センター／開拓研究本部
田中拓男

1. はじめに

「ベルは電話を発明する前に市場調査などをしたのか？」故スティーブ・ジョブズがパーソナルコンピュータ Macintosh について「きちんと市場調査をして開発したのか」と聞かれた際に応じた有名な台詞の 1 つである。パソコンを見たことがない人にパソコンについて調査をしても無意味だというわけである。身近な所では、筆者が子供の頃のテレビはブラウン管でできていて、奥行きのある箱形のものであった。いつかは壁掛けテレビが登場するといった空想話もあったが、当時は全く想像ができなかった。それが今やテレビは平たいものが当たり前で本当に壁に掛かっている。イノベーションとは突然やってきて、凡人にはそれを予想するのは難しいものなのかもしれない。本稿の主題である「メタマテリアル」も光分野にそのような革命を起こしてくれるサイエンスとテクノロジーである。

2. メタマテリアルとメタサーフェス

「メタマテリアル」は、用いる波の波長よりも細かな構造で構成した人工物質である。敢えて「波」と書いたのは、今やメタマテリアルは電磁気学分野に留まらず、音波や物質波など、波を扱うあらゆる分野で研究される分野になっているからである¹⁾。もちろん光学領域における波とは光波もしくは電磁波である。メタマテリアルの構造は波長よりも細かいので、可視光で動作するメタマテリアル(以下「光メタマテリアル」)の場合、その構造のサイズはナノメートルスケールとなる。メタマテリアルが研究され始めた今世紀初め頃はまだそのようなナノ構造を自由自在に作製することは難しかったが、最近では根本的に解決したとは言い切れないものの、それでも電子ビームリソグラフィなどのナノ加工技術の発展や、さまざまな自己組織化現象を利用した手法などが開発され、光メタマテリアルを実際に加工できる技術基盤は整ってきた²⁾。

加工の容易さの観点からは、完全な 3 次元ナノ構造の加工よりも平面的な 2 次元構造の加工の方が容易である。そのため、メタマテリアルにおいてもバルク状の 3 次元メタマテリアルの研究よりも 2 次元メタマテリアルの方が先行している。この 2 次元メタマテリアルは今日では「メタサーフェス」と呼ばれており、ここ最近非常に多くのメタサーフェスが研究されている。

メタサーフェスの起源は、2011 年にハーバード大の Capasso のグループが Science に発表した論文に遡るといって良いであろう³⁾。この論文で Capasso らは、Si などの基板の表面に金属の共振器を配列させた構造を提案している。この構造では、1 つ 1 つの共振器はその共振周波数付近の光波と強く相互作用してその光の位相を大きく変化させる。このような光波に位相ずれを与える共振器構造をその位相ずれ量に注意しながら並べてゆくと、その構造を通過した光波の波面を操作できる。ちょうどフェーズアレイアンテナのようなものを想像すれば良い。ポイントは、従来の光学では、物質界面における光の屈折や反射はその境界面を構成している 2 つの物質の屈折率のみで決定され、反射の法則(入射角=反射角)や屈折の法則(スネルの法則)として記述されているのに対して、界面にナノ構造があると、その存在も考慮しなければならず、従来の反射・屈折の法則とは異なる角度に光波が