

メタマテリアル研究の四半世紀

小西 邦昭[†]

A Quarter Century of Metamaterials Research

Kuniaki KONISHI[†]

私は、当初はメタマテリアルと呼ばれる名称で、現在ではメタサーフェスと呼ばれることが主流になってきた、人工微細構造を用いた光波制御の研究に学生時代から関わってきた。先日、ある研究会でこの分野に関する自身の研究を講演する機会を得たが、参加者は100人を超え、その多くが研究機関だけでなく企業の方々であったことに驚かされた。メタマテリアルという概念が登場してから約25年が経過し、光やレーザーを制御する技術として、いよいよ実用への道が拓けつつある。ここでは、この分野の成り立ちとこれまでの歴史を簡単に振り返ってみたい。

この研究分野は、1999年にイギリスの物理学者ジョン・ペンダーリーらによって、人工構造により磁気共鳴を可能とし、実効的に負の誘電率および透磁率を有する、波長以下の構造を備えた金属人工材料の提案がなされたことに始まる。翌2000年には、その理論に基づいた負の屈折率の実証がマイクロ波帯で報告され、「光を負の方向に曲げる」「スーパーレンズ」「透明マント」といった話題が注目を集めた。一方、黎明期にはこうした特異な光学応答がマックスウェル方程式と整合するの可否かという、物理学の根幹に関わる議論も交わされた。現在では、マックスウェル方程式の正当性は再確認され、メタマテリアルはその一般解の未踏領域を拓いたものと理解されている。また、2000年代には、1998年にエベッセンらが報告した金属サブ波長ホールアレイ構造による異常透過現象を契機に、人工金属ナノ構造におけるプラズモン共鳴を活用した光波制御技術、いわゆるプラズモニクスも急速に発展した。それに伴い、メタマテリアルの材料として金属が強く注目された。一方、2010年代に入ると、メタマテリアルの概念はメタサーフェスへと拡張された。メタマテリアルが同一の単位構造を周期的に配列するのに対し、メタサーフェスでは空間的に異なる単位構造が配置される場合も含まれる。このような非一様構造では、散乱波の干渉を利用することで自然界にない新たな光学機能が発現する点が注目された。さらにこの頃から、ナノ構造材料として金属に代わって誘電体が注目されるようになる。ミー共鳴理論に基づき、波長程度の大きさの誘電体構造でも磁気共鳴が生じることが再認識されたためである。金属構造ではジュール熱による損失が避けられないが、誘電体構造では損失が小さく、高Q値の共鳴が可能となる。こうした背景から、誘電体ナノ構造によるメタサーフェスで作られた可視光領域のレンズ(メタレンズ)が、2016年にキャパツソらによって報告されると、レンズという基本光学素子を根本から再設計可能とするメタレンズは、メタサーフェスの産業応用への可能性を大きく広げるものとなり、現在ではスマートフォンやカメラなどへの搭載も現実味を帯びつつある。

このようなメタサーフェス研究の進展には、半導体微細加工技術の発展が不可欠であった。2010年代には紫外光を用いたフォトリソグラフィーの分解能が数10ナノメートル以下に達し、可視光メタレンズの作製に十分な解像度が得られるようになった。電子線リソグラフィーによる研究レベルでの試作と、フォトリソグラフィーによる量産との間で、好循環が形成されている。一方、メタマテリアルの物理的基礎となる現象は、いずれも古くから知られていた。表面プラズモンは1960年代にオットーやクレッチマンにより観測され、ミー散乱は1900年代初頭にミーにより理論化されている。さらに、負の屈折率を持つ媒質中での光伝搬も、1960年代にベセラゴが理論的に検討している。すなわち、現在のメタマテリアル研究は、先人の理論的知見と最新のナノ加工技術が融合して生まれた、新たな波動制御技術であると言える。

現在、メタマテリアルおよびメタサーフェスの研究は、フォトニクスにとどまらず、通信、センシング、バイオイメージング、量子技術など多分野との連携を通じて発展しつつある。また、光のみならず、音、熱、機械振動など、他の波動現象への応用展開も進んでいる。25年という年月を経て、メタマテリアル研究は今、理論、設計、加工の各要素が高度に交差しつつ、実応用を目前に控えた新たな段階にあると言える。それは、光工学やレーザー技術に携わる我々にとっても、今後を見通すうえで重要な契機である。次の25年に、どのような「メタ」の展開が待ち受けているのか、その進展を大いに期待したい。

[†] 東京大学大学院理学系研究科附属フォトンサイエンス研究機構(〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1)

[†] Institute for Photon Science and Technology, Graduate School of Science, The University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0033