

メタマテリアルの研究 — 新奇な電磁波伝搬現象の実現とその応用を目指して —

私たちにとって身近なマイクロ波

先進電磁波動工学研究室の上田哲也准教授は、研究室のミッションを次のように語ります。「マイクロ波やもっと高い周波数のテラヘルツ波、あるいは光を問わず、電磁波全般に関して、従来にはない新奇な伝搬現象が実現できないか研究しています。さらに、それが実現できたら、今度はワイヤレス通信・電力伝送など、工学的に応用できないかということで研究を進めています。私は本学に助手として着任したのが1997年で、当時所属していた研究室の教授がマイクロ波研究の第一人者だったこともあり、私もマイクロ波の研究をするようになりました。」

マイクロ波の技術は、私たちの生活に身近であると上田先生は言います。「ラジオ、テレビ、携帯電話などの通信応用の他、電子レンジなどの加熱応用もあります。最近のトピックとしては、車載無線技術として、衝突防止レーダ等にも使われています。さらには、電気自動車の充電を無線で行う無線電力伝送や、化学の分野でもマイクロ波によって化学反応を促進させる研究なども行われています。そうしたなかで、私が研究しているのはメタマテリアルという分野です。」

負の屈折率を実現するメタマテリアル

「メタマテリアルと言っても、材料そのものではありません。それは、従来の材料特性にはない特異な電磁波伝搬特性を実現する人工構造体のことです。」と上田先生は言います。「通常の材料は、原子・分子から構成されていて、それらの平均的な性質として誘電率や透磁率が決まります。磁石を近づけたときに、磁氣的に材料が応答してN極、S極に磁気分極する、その大きさが透磁率です。あるいは、電圧を加えて、プラス、マイナスにどれだけ分極するか、その大きさの程度が誘電率です。メタマテリアルは、その誘電率と透磁率を人工的に変化させ、特異な電磁現象を発現させます。」メタマテリアルが実現する特異な電磁現象の代表例として、上田先生は負の屈折率を挙げます。「物質中での光の進み方を表す重要なパラメータとして屈折率がありますが、自然界に存在する多くの物質の屈折率は正の値をとります。通常、光は空気と物質との境界面で屈折すると、光の進む向きは少し変化しますが、同じ側に折れ曲がります。これに対して反対側に折れ曲がる、すなわち屈折角がマイナス

になる場合を負の屈折率といいます。通常の物質ではそうした特性は見られません。」メタマテリアルが負の屈折率を実現する仕組みについて上田先生は次のように言います。「負の屈折率は、誘電率と透磁率が同時に負の値を取るよう設定すれば実現可能ですが、原子・分子自体の電気分極と磁気分極を実際そのように操作することは容易ではありません。それに対して、メタマテリアルでは、振動する光の磁場に対して、まるで磁気分極が起きているかのように見せかけます。透磁率を変化させるために、振動する光の磁場と相互作用する人工磁性構造体を作るわけです。どのような仕組みかといえば、光や電波には波長がありますが、その波長よりも小さいスケールであれば、光や電波は、その構造体の詳細な形を知ることができず、言ってみれば光や電波にとってはその構造体は原子と同じようにみえます。波長よりも小さなスケールの粒を単位セルと呼ぶのですが、それを構成要素として上手く設計して並べますと、光や電波からみると平均化され、滑らかにみえる、いわば見せかけの構造体なわけです。単位セルの形状や、配置などの構造設計により、誘電率と透磁率を自在に操ることが可能となり、負の屈折率も実現します。」

研究において大事なのはアイデアの組み合わせ

「実際のメタマテリアルの構造体は単純です。」と、上田先生は言います。「裏面が金属板で、横から見ると透明です。この透明な厚さ1ミリぐらいの誘電体基板の上にパッチという、正方形の金属の板を並べて、裏側の接地面とショートさせています。こうした構造をマッシュルーム構造といいます。こういう構造をたくさん並べると、実質的な誘電率と透磁率が同時にマイナスになるような効果がありまして、負の屈折率を実現する構造として知られています。」

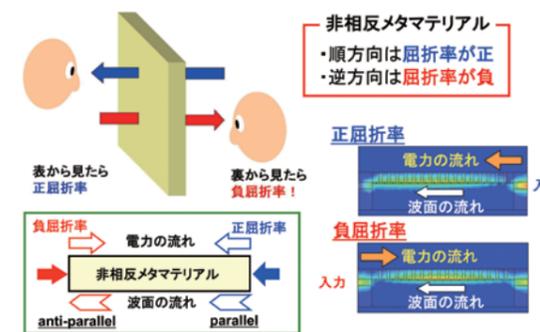
各国でメタマテリアルの研究が始まったのは2000年後であり、上田先生はわが国においていち早く、2003年頃に研究を始めました。上田先生は、「私の研究においては、コンセプトが重要」と言います。「実験よりも、デザインがメインです。メタマテリアルの構造体は、とても微妙なバランス

で成立しており、いい加減なものをつくると求める特性が出ません。きっちりとつくることが必要で、その意味で設計が非常に重要です。」さらに上田先生は、「研究は全く何もないところからは生じない。」と言います。「アインシュタインの相対性理論でさえ、何もないところから思いついたわけではなく、ローレンツ変換という4次元空間の座標変換の元になる重要な式は別の人が提示しています。大切なのはアイデアの組み合わせです。私の場合、お世話になっていた教授が磁性体材料を使って、アインレータやサーキュレータなどの非相反回路の研究をされていました。そうしたこともあって、私は磁性体とメタマテリアルという概念を組み合わせ、新しいメタマテリアルをつくれなかと考えました。」

新しいメタマテリアルの開発

上田先生は、「研究とはパズルのようなもの。」と言います。「組み合わせの難しいパズルをいかにして解決するか、組み合わせの相手の吟味はもちろん重要ですが、断片をどうつなぐかということも大切です。しかし、簡単にはいきません。一つのテーマを追いかけるだけでは行き詰まってしまうので、複数のテーマを手掛けるようにしています。いくつか種をまいて、少しずつ研究を進めながら、時々ある分野に特化して集中するという感じです。アイデアを一旦は寝かせることも重要です。磁性体を用いたメタマテリアルの研究も、なかなか上手くいきませんでした。そこで一旦は中断し、渡米してカリフォルニア大学で研究を行い、帰国後にその研究を再開しました。その結果、伝搬方向により伝送特性の異なる非相反回路と、メタマテリアル技術とを組み合わせ

非相反メタマテリアルの獨創性



せることにより、電磁波が順方向に伝搬する場合は正の実効屈折率を示すのに対して、逆方向に伝搬すると負の屈折率を示す、新しいタイプのメタマテリアルとして『非相反メタマテリアル』の開発に成功しました。」

非相反メタマテリアルは、様々な工学的応用の可能性がある」と上田先生は言います。「非相反メタマテリアルの性質を用いると、共振周波数が共振器サイズに依らず、大きさを自由に変えられる進行波共振器が構成でき、さらに小型で高放射効率のビーム走査アンテナにも応用できます。さらにはビーム方向だけでなく、主偏波方向を所望の方向に回転制御できるアンテナも実現できます。」こうしたことから、上田先生の研究室では産学連携の共同研究の取り組みも開始されています。「メタマテリアルの概念を使ったセンサーやアンテナの研究開発を目指して、昨年からは自動車電子部品メーカーとの産学連携の共同研究も開始しています。」メタマテリアル分野では、その技術を用いて透明マント(クロウキング)の研究などもされており、その応用可能性は極めて大きいです。日本におけるメタマテリアル研究の第一人者として、上田先生の研究成果は、様々な分野でその応用が期待されています。



先進電磁波動工学研究室
 電気電子工学系
 上田哲也准教授