メタマテリアルで光を操る

冨田　知志*(奈良先端科学技術大学院大学)

Manipulating the light using metamaterials

Satoshi Tomita (Nara Institute of Science and Technology)

１．はじめに

人間はとかくわがままな生き物である。何かを思いの通りに操りたいという衝動につい駆られてしまう。光に対してもその姿勢は貫かれている。教室の窓から差し込んでくる日光を、小学生が下敷きで反射させて、同級生の顔に当てて喜んでいるのは、いたずらごころからだけではないはずだ。

ここでは操るという行為の中でも、ものが進む軌跡を曲げることを考えたい。もしその何かが質量や電荷を持っていれば、比較的容易である。質量があるものには、野球のボールをバットで打つように、撃力を加えれば軌跡は曲がる。電荷があれば、テレビのブラウン管の中での電子のように、電場や磁場を加えれば良い。では、電荷も質量も持っていない光（電磁波）の場合、どうすればよいだろうか。

光を曲げるためには、光が通る物質（媒質）を変えるしかない。例えば上述の教室の風景では、空気から下敷きに変わった。また光が水から空気に侵入すると曲がるので、手や足が曲がって見えることは、入浴のときに体感できる。この光を曲げる能力は、物質や媒質の屈折率としてあらわされる。屈折率―簡単には物質の密度に比例する―を自在に変えることができれば、光を自在に操れそうである。

これまで物質の屈折率を変えることは、化学的手法が得意とした。たたら製鉄で鏡や、溶融法でレンズ用ガラスを作る工程を思い浮かべていただきたい。もちろん鏡やレンズの設計では物理学的知見も用いてきたが、こと材料を生み出す過程は化学の独壇場であったと言っても過言ではない。しかし 20 世紀が終わりに近づいたころから、化学的知見だけでなく、物理学的知見、更には電気工学の考え方も併用して、物質の屈折率を変化させる手法が現れた。それがメタマテリアルである。

２．メタマテリアル

メタは、ギリシア語に語源を持ち、「越える」を意味する。メタマテリアルは、マテリアル（物質）を越えたマテリアルと言える。例えば、もっとも代表的なメタマテリアルのひとつである、マイクロ波（周波数 GHz）領域で負の屈折率を持つメタマテリアルを考えてみる。

屈折率は、誘電率（ε）と透磁率（μ）の積の平方根である。εとμは電磁波の周波数によって変化する。εは物質が電磁波の電場にどのように応答するかを表す。コンデンサの静電容量にも関係する重要なパラメータである。一方、μは物質が電磁波の磁場にどのように応答するかを表す。εとμの起源は共に物質中の電子である。電子が集団的な縦振動（プラズマ振動）をするとεが負の値を取る場合がある。電子が環状に動くとμが負の値を取ることがある。電子がこれらの運動をする周波数は異なり、天然の物質での負のεは高周波で、負のμは低周波でおきる。よってεとμがマイクロ波領域で同時に負になることはない。

ところが人工構造を作り、電子の運動を制限してやれば状況が変わる。ジャングルジム構造を銅で作ると、マイクロ波領域で負のεが得られる[1]。また銅で C 字型共振器（スプリットリング共振器：SRR）を作ると、LC 共振によりμが負になる周波数がマイクロ波領域で精密に調整できる[2]。電磁波の波長以下のサイズを持つこの二種類の人工構造を組み合わせることで、εとμを同時に負にできることが 2000 年に明らかになった[3]。その結果、屈折率が負になり、マイクロ波が通常とは反対方向に屈折することが実験的に示された[4]。これが負の屈折率を持つメタマテリアルである。

ここで重要な点が二つある。第一は、材料―いまの場合は単なる銅―そのもののεやμが負になったわけではなく、ジャングルジムや SRR というデザインされた構造を作り込むことで、εとμを変化させることである。そして第二には、電磁波の波長よりも小さなそれらの構造を組み合わせることで、光から見ればあたかも負の屈折率が存在するかのように見せかけることができる、ということである。

３．メタマテリアルでの対称性の破れ

天然物質では実現不可能な負の屈折率を持つメタマテリアルは、基礎及び応用の観点から極めて興味深かったため、この発見に端を発して、メタマテリアルの研究は爆発的に進展した[5,6]。その後、SRR をドーナツ状に並べて、マイクロ波領域でのクローク（隠れ蓑）の実現も報告された[7]。厳密にデザインされた SRR を並べることで、マイクロ波が、あたかも川の流れが岩をすり抜けるように、メタマテリアルの中を曲げられながら進み、ドーナツの中心にあるものが不可視となる仕組みである。

ところで、これらのメタマテリアルのみならず物質で曲げられた光は、屈折率が正であれ負であれ、光の進行方向を替えても同じ軌跡をたどる。つまり物質の表から光を入

©2015 IEE Japan

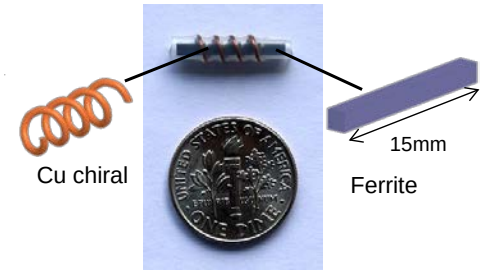

Fig.1 Center: A photograph of the MCh metamolecule. Diameter of the coin in the photo is 17.91 mm. Illustrations of Cu chiral structure (left) and ferrite rod (right).[14]

れ曲がり裏側に抜けた後で、鏡ではね返し（進行方向を逆転させ)、再び同じ物質に裏から光を入れ、表に出てくる場合を考えよう。この場合、進行方向が逆転しても、光の軌跡は同じである。しかしもし、進行方向を逆転させると光の軌跡が変わるような物質があれば、マジックミラーのような働きをするため応用の観点から興味深い。それのみならずこのような物質は、荷電粒子に対するローレンツ力のアナロジーから、電荷を持たない光に対する「磁場」のような働きをすると考えられ、基礎物理的な観点からも奥が深く大変面白い。これまでのところ電場により磁気分極し、磁場により電気分極するマルチフェロイックスと呼ばれる材料[8]で、このような非相反な光の振る舞いを実現できるとされているが、実験的には未確認である[9]。

ここで原理に立ち戻って考えなおそう。光を操るには屈折率を制御するしかない。光を曲げるためには、光の進行方向と直交する方向に屈折率の勾配を付ければよいことが知られている。さらに進行方向に依存して光の振る舞いを変えるには、光の進行方向に依存して屈折率が変化する必要がある。これを「方向依存する複屈折」と呼ぼう。方向依存する複屈折を得るには、物質の中で空間反転対称性と時間反転対称性を同時に破る必要がある。空間反転対称性は、ネジや螺旋階段など、カイラル（キラル）構造で破れている。一方、時間反転対称性は磁場や磁性体で破れている。時間反転対称性と空間反転対称性が同時に破れると、磁気カイラル効果[10,11]により偏光無依存で方向依存する複屈折がおきる。つまり磁気カイラル媒質の密度を、光の進行方向に直交する方向に変化させれば良さそうだ。

磁気カイラル効果は、原理的には天然のカイラル分子に磁場をかければ得られるが、その効果は極めて小さいことが報告されている。表裏の屈折率差にして 10^{-8} から 10^{-10} の変化しかない[12,13]。そこでメタマテリアルの出番となる。次節では磁気カイラルメタマテリアルの構成要素として、空間反転対称性と時間反転対称性が同時に破れたメタ分子についての我々の実験結果[14]を紹介する。

4．磁気カイラルメタ分子のマイクロ波応答

Fig.1 の中央上に我々のメタ分子の写真を示す。まず直径 0.55mm の銅ワイヤを右ねじの方向に 4 回巻いたカイラル構造を作製した（左絵)。その中心に断面積 1.5mm×1.5mm、長さ 15mm のフェライトロッド（右絵）を挿入した。そして熱収縮チューブで固定し、メタ分子を作製した。中央下のコインの直径が 17.91mm であるので、メタ分子は X バンドのマイクロ波の自由空間での波長（約 30mm）よりも小さいことがわかる。

メタ分子を WR-90 導波管に挿入し、X バンドのマイクロ波の透過を調べた。一方向の透過係数は S_{21}、逆方向に進むマイクロ波の透過係数は S_{12} とあらわされる。電磁石で外部磁場を加えながら、S_{21} と S_{12} の振幅と位相を同時に測定した。

Fig.2(a)に無磁場下でのマイクロ波透過の振幅スペクトルを示す。赤が S_{21}、青が S_{12} である。周波数 6.6GHz 以下のマイクロ波は導波管の都合で透過しない。それ以上の周波数では、7.5GHz と 10.2GHz に落ち込みが見える。これは銅カ

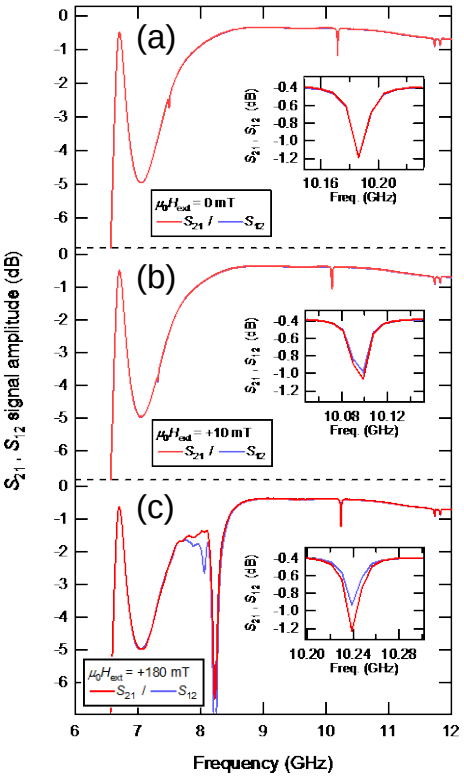

Fig.2 Transmission S_{21} (red) and S_{12} (blue) amplitude spectra of the single MCh metamolecule under the external dc magnetic fields of (a) 0 mT, (b) +10 mT, and (c) +180 mT. Insets: enlarged spectra at the resonant optical activity around 10 GHz.[14]

©2015 IEE Japan

イラル構造による光学活性に起因する。光学活性は、カイラル構造で偏光面が回る現象として知られている。直線偏光は左及び右回り円偏光の合成である。カイラル構造に対して右と左の円偏光では屈折率が異なる。よってカイラル構造を通過した後は、左右円偏光で位相遅れに差が生じ、直線偏光の偏光面が回転する。これが光学活性である。Fig.2(a)ではメタ分子のカイラル構造で偏光回転したため、透過が落ち込んでいる。10.2GHz 付近の拡大を挿入図に示す。ここから S_{21} と S_{12} で差はないことがわかる。これは空間反転対称性の破れによる光学活性では当然の結果である。表と裏の屈折率が差を持ち、S_{21} と S_{12} が異なるためには、磁場をかけて時間反転対称性も破らねばならない。

電磁石を用いて+10mT の外部磁場を加えた結果を、Fig.2(b)に示す。無磁場下同様に 7GHz と 10GHz 付近に落ち込みが見える。ここで注目していただきたいのは、挿入図の 10GHz 付近の振幅スペクトルである。S_{12}（青）に比べて S_{21}（赤）の落ち込みが若干深い。これは外部磁場を印加したことで時間反転対称性も破れ、表と裏で屈折率差が生まれたことに起因する。これがまさに磁気カイラル効果である。

外部磁場を更に+180mT まで強くした結果を Fig.1(c)に示す。10GHz 付近の S_{21} と S_{12} の差は大きくなっている。また 8GHz 付近に大きな落ち込みが見て取れる。これはフェライトロッドでの磁気共鳴による落ち込みであり、カイラリティとは無関係で、磁気カイラル効果とは本質的に異なる現象であると考えられる。

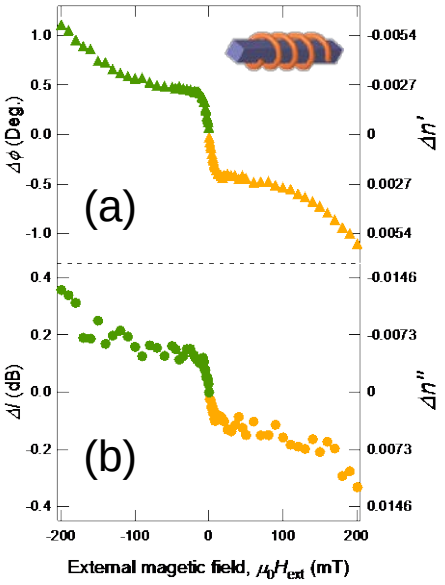

Fig.3 Differences in (a) phases and (b) amplitudes are plotted as a function of external magnetic field. Evaluated differences in the index of refraction are also indicated from the right axes.[14]

我々の実験では S_{21} 及び S_{12} 透過係数の、振幅差と位相差が同時に測定できた。これより屈折率の実部と虚部を直接見積もることができる。Fig.3 に実験から見積もった屈折率差の直流磁場依存性を示す。Fig.3(a)の左軸は透過係数の位相差、右軸はそれから計算した屈折率の実部の差を示す。Fig.3(b)の左軸は透過係数の振幅差、右軸はそれから計算した屈折率の虚部の差を示す。

驚くべきことに 1mT という弱い磁場を加えただけで、磁気カイラル効果が発現している。磁場を強くしてゆくと、±10mT あたりまでは屈折率差が急激に拡大し、その後は緩やかに増加する。これはフェライトの磁化されやすい軟磁性を反映していると考えられる。そして最終的に 200mT の外部磁場をかけると実部で 10^{-3}、虚部では 10^{-2} の屈折率差が得られた。この値はこれまで報告されている強磁場下での天然カイラル分子の磁気カイラル効果による屈折率差（10^{-8} から 10^{-10}）に比べると桁違いに大きい。我々のメタ分子ではカイラル構造での共鳴を利用したため、このような大きな屈折率差を実現できたと考えている。

５．まとめと今後の展望

メタマテリアルは、材料そのものの性質だけでなく、構造によって発現する機能を積極的に利用し、天然の物質では得られない特性をもたらす人工物質である。我々は非相反に光を曲げる手段を得るために、空間反転対称性と時間反転対称性が同時に破れたメタマテリアルに興味を持っている。今回、そのようなメタマテリアルの構成要素としての磁気カイラルメタ分子を、銅のカイラル構造とフェライトロッドを組み合わせることで実現した。外部磁場を加えることで、X バンドのマイクロ波領域にある共鳴的光学活性の周波数で、磁気カイラル効果を直接観測した。得られた屈折率差は、これまで報告されている強磁場下での天然カイラル分子の磁気カイラル効果による屈折率差に比べると桁違いに大きかった。現在、構造をダウンサイジングすることでミリ波、テラヘルツ波、可視光領域での磁気カイラル効果の観測にも取り組んでいる。

今後は、この磁気カイラルメタ分子を組み合わせて磁気カイラルメタマテリアルを構築し、マイクロ波を非相反的に曲げることを試みたい。このような研究はマイクロ波マジックミラーの実現と言う観点から、応用物理学やマイクロ波工学の分野で興味深い。それのみならず基礎物理学の観点からも、光にとっての人工的ゲージ場の創成と言う重要な意味を持つ。さらに波長が人間の身の丈に合っていて、人工構造を作製しやすいマイクロ波の特性を活かし、天然の物質では困難な物性をメタマテリアルで実現する、メタ固体物理学まで視野に入れている。

本研究は、澤田桂（理化学研究所 SPring-8）と上田哲也

©2015 IEE Japan

（京都工芸繊維大学）との共同研究である。また萩行正憲（大阪大学）、児玉俊之、柳久雄（奈良先端科学技術大学院大学）の各氏との議論にも感謝したい。本研究は科研費・新学術領域研究「電磁メタマテリアル」、科研費・基盤研究(B)、光科学技術研究振興財団・研究助成によって支援されている。ここに感謝の意を現したい。

文　献

(1) J. B. Pendry et al., Physical Review Letters 76, 4773 (1996).

(2) J. B. Pendry et al., IEEE Transactions on Microwave Theory Techniques 47, 2075 (1999).

(3) D. R. Smith et al., Physical Review Letters 84, 4184 (2000).

(4) R. A. Shelby et al., Science 292, 77 (2001).

(5) D. R. Smith et al., Science 305, 788 (2004).

(6) C. M. Soukoulis and M. Wegener, Nature Photonics 5, 523 (2011).

(7) D. Schurig et al., Science 314, 977 (2006).

(8) I. Kézsmárki et al., Nature Communications 5, 3203 (2014).

(9) K. Sawada and N. Nagaosa, Physical Review Letters 95, 237402 (2005).

(10) L. D. Barron and J. Vrbancich, Molecular Physics 51, 715 (1984).

(11) G. L. J. A. Rikken and E. Raupach, Nature 390, 493 (1997).

(12) P. Kleindienst and G. H. Wagnière, Chemical Physics Letters 288, 89 (1998).

(13) M. Vallet et al., Physical Review Letters 87, 183003 (2001).

(14) S. Tomita et al., Physical Review Letters 113, 235501 (2014).

©2015 IEE Japan