

屈折率って何？—現代の“巨視的電磁場”問題—

Keyword: メタマテリアル

1. はじめに

今さら“屈折率”でもないだろうに、とおっしゃる向きもあるかも知れない。しかし、この十数年間、大まじめに研究が続いている。¹⁻³⁾ ご承知のように屈折率は、スネルの法則にしたがって光の屈折を表現する物質定数である。手元にあった理科年表を見ると、水の屈折率が約1.33などと記されている。もう少し基本的な量で表せば、

$$\text{屈折率} = \sqrt{\text{比誘電率} \times \text{比透磁率}} \quad (1)$$

であるが、これも良くご存じの通りである。

それでは、なぜ、今さら屈折率なのか。実はこれから述べるメタマテリアルの登場によって、旧来の屈折率の概念が少なからず変わってしまったからである。それはまた、現代的な“巨視的電磁場”問題を提起し、これまで思ってもみなかった奇妙な光学現象を実現した。

2. 微視的電磁場と巨視的電磁場

さて、真空の誘電率と透磁率を ϵ_0 , μ_0 と記すと、比誘電率 (ϵ) と比透磁率 (μ) はそれぞれ、電場 (\mathbf{E}) と電気変位 (\mathbf{D})、磁場 (\mathbf{H}) と磁束密度 (\mathbf{B}) の比例関係を与える：

$$\mathbf{D} = \epsilon\epsilon_0\mathbf{E}, \quad \mathbf{B} = \mu\mu_0\mathbf{H} \quad (2)$$

ここに現れた \mathbf{E} や \mathbf{H} などは、物質の構成要素である原子や分子よりは大きく、波長よりは小さなスケールで粗視化した(空間平均を取った)電磁場であり、巨視的電磁場と呼ばれる。これに対して、例えば、原子核のごく近くでは電場はたいへん大きな値を取り得るが、このような微視的電磁場は誘電率や透磁率、あるいは、屈折率で記述する対象ではない。比誘電率などの物質定数を測定で求めるなどすれば、式(2)で物質中の電磁波の伝搬を正確に記述できる。

筆者も学生のころにこのように教わり、これで一件落着と信じていたが、そうでもなくなってきた。最先端のナノ加工技術を使うと、原子や分子のスケールよりは大きいものの、光の波長よりは小さい人工物を作ることができる。あるいは、マイクロ波(波長がmm~cm程度)を対象とする場合などでは、波長よりも小さな人工物は簡単に作製できる。さて、この場合、巨視的電磁場を記述する誘電率や透磁率はいくらになるか？ あるいは、誘電率や透磁率はうまく定義できるか？ このように考えてくると、これまで物質固有の定数と考えていた屈折率も、人為的に設計が可能なる量かも知れないと思に至る。

3. メタマテリアル

今日、“メタマテリアル”は広義には、“原子・分子よりは大きく、対象とする電磁波の波長よりは小さな構造物、あるいは、その集合体”といった意味で使われる。狭義には、後述の“負の屈折や透明マントなどの特異な光学現象を実現する、波長よりも小さな構造物、あるいは、その集合体”を指す。特異な光学現象の実現には電磁的な共鳴状態を利用することが多いので、それを可能にするために狭義のメタマテリアルはほとんどの場合、金属で作製される。

マイクロ波領域ではメタマテリアルの3次元積層も可能であるが、光波(赤外~可視)領域では最先端のナノ加工技術をもってしても3次元積層は難しい。そこで、適当な基板上にメタマテリアルを並べた“メタ表面”が多くの場合、主な研究対象である(図1参照)。

さて、メタマテリアル研究の初期に注目を集めたのは、スプリットリング共振器と金属ワイヤを用いた負の屈折率の実現である。¹⁾ 誘電率と透磁率がどちらも負の場合、屈折率も負になる。(式(1)で誘電率と透磁率をどちらも負の実数と考え、マイナスとマイナスの積でルートの中が正になり、屈折率が正になるように見えるが、実際は誘電率も透磁率も多かれ少なかれ、損失に由来する虚部も持っているため、複素平面で屈折率の偏角を注意深くたどれば、屈折率の実部が負であることが分かる。)

通常の屈折現象(屈折率が正、図2(a))と比べて、負の屈折率の場合には屈折光が進む向きが法線を挟んで反対側になる(図2(b))。このとき、界面に平行な波数成分が保存していないように見えるので、並進対称性による要求が満たされていないのではないかと心配されるかも知れない。しかし、屈折率が負であると波数ベクトル (\mathbf{k}) とポインティングベクトル ($\mathbf{E} \times \mathbf{H}$) が互いに反対向きになるので、界面に平行な波数成分は保存している。実際、屈折率が正の物質中では \mathbf{E} , \mathbf{H} , \mathbf{k} は右手系をなすが、屈折率が負の物

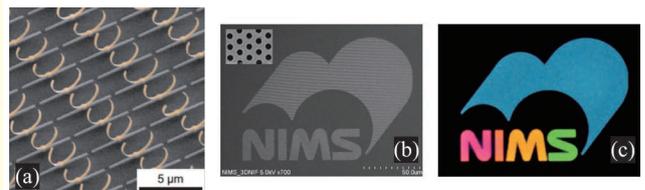


図1 光波領域のメタマテリアル。(a) スプリットリング共振器の2次元配列。⁴⁾ (b) 金属薄膜に形成した光の波長よりも小さなナノホールアレイの電子顕微鏡像と。(c) カラーフィルター機能。ナノホールのおおきさ毎に透過波長が異なるので色づいて見える。⁵⁾

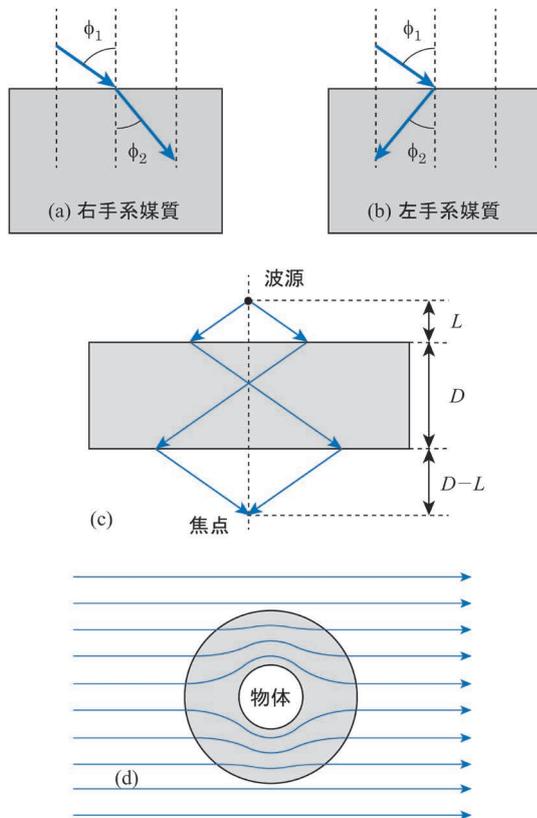


図2 (a) 正の屈折率と、(b) 負の屈折率による屈折。(c) 屈折率が-1のメタマテリアル平板によって実現される、回折限界を超える完全レンズ。(d) 屈折率分布の調節により、光線が障害物を避けて通る透明マント現象。

質中では左手系をなす。そこで、負の屈折率をもつ物質は左手系媒質とも呼ばれる。

誘電率については、プラズマ振動数よりも低い振動数で一般に金属が負の値を取る。これに対して、負の透磁率の実現には円環の一部が欠けた構造(スプリットリング共振器)が用いられた。マイクロ波を対象として試料が作製され、負の屈折が実証された。²⁾ 負の屈折が実現できると、図2(c)に示すように、メタマテリアル平板による完全レンズ(回折限界を超える解像度をもつレンズ)も実現できる。さらに、試料構造を調節して場所ごとに屈折率の値を変化させると、障害物を避けて光線が伝搬することも実証された(図2(d))。⁶⁾ 障害物の向こう側から見ると、光はあたかも直進してきたように見える。これはちょうど、ハリウッドの透明マントのようであり、日本語では透明マント、英語ではcloakingと呼ぶ。この呼び名が一般受けしたことで、重い星の周りで光線が曲げられる場合の計算と類似性があったことなどから、光物性分野以外の研究者の注目も集めることとなった。

周期的なメタマテリアルでは構造を調節して、ブリルアンゾーンの中央(Γ 点)で2つの分散曲線が交わるようにすると、等方的で線形な光の分散関係(ディラックコーン)が実現できる。このとき、分散曲線の交点はディラック点と呼ばれ、その振動数で屈折率がゼロになる。この現象は最初、マイクロ波の伝送線路理論を用いて発見され、⁷⁾ その後、 $\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}$ 摂動論と群論を用いて一般の場合が証明された。⁸⁾

4. おわりに：現代の“巨視的電磁場”問題

最初の設問、“屈折率って何？”に戻ろう。マイクロ波について言えば、メタマテリアルの寸法は $100\mu\text{m} \sim 1\text{mm}$ のオーダーであり、原子や分子の大きさとは桁が違っている。したがって、通常の意味で屈折率がちゃんと定義でき、その屈折率分布を使って試料中の電磁波伝搬を計算することができる。他方、メタマテリアルを人工原子と考えて、 $100\mu\text{m} \sim 1\text{mm}$ オーダーまで粗視化した屈折率を定義することもでき、これまで述べたような新現象を予測するための発見的な理論研究に大いに役立った。したがって、このような現代的な巨視的電磁場理論もたいへん有用である。

これに対して、光波領域のメタマテリアルでは問題はもう少し深刻である。メタマテリアルの寸法は $100\text{nm} \sim 1\mu\text{m}$ のオーダーであり、年々、小さな試料が作製できるようになってきている。いずれ、原子の大きさとメタマテリアルの大きさの間に、明瞭な境界を引くことが難しくなるであろう。そのとき、どんな“屈折率”を使うべきか？、屈折率はうまく定義できるか？、誘電率と透磁率は独立か？、等の原理的な問題が生じる。今日、マイクロ波、THz波、光波のすべての領域にわたって、いろいろな応用研究も進んでおり、³⁾ そのための現実的な試料設計が必要である。これに加えて、巨視的電磁場に関わるこのような原理的な問題にも答える必要がある。

参考文献

- 1) D. R. Smith, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **84** (2000) 4184.
- 2) R. A. Shelby, *et al.*: Science **292** (2001) 77.
- 3) 石原照也, 真田篤志, 梶川浩太郎監修: 『メタマテリアルII』(シーエムシー出版, 2012).
- 4) 理化学研究所田中拓男博士のご厚意により、許可を得て掲載。
- 5) 物質・材料研究機構 杉本喜正博士のご厚意により、許可を得て掲載。
- 6) D. Schuring, *et al.*: Science **314** (2006) 977.
- 7) C. Caloz and T. Itoh: *Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Applications* (Wiley, 2005).
- 8) K. Sakoda: Opt. Express **20** (2012) 25181.

迫田和彰(物質・材料研究機構先端フォトニクス材料ユニット)

(2015年5月25日原稿受付)