



自然界にはいろいろな右手系と左手系が存在します。人間世界はどちらかというと右手系が主流であるのはご存じのとおりで、字の書き方、ドアのノブ、はたまたパチンコ台のダイヤルの位置に至るまでおおむね右利きに便利な構造になっていて、左利きの人は時には不便な思いをします。自然界は、どちらかというともう少し優しくて、植物の蔓や巻き貝の巻き方など、種類によってまちまちですが、どちらかが住みにくいなどということはないようです。結晶や分子の世界においても右手系・左手系があって、構成する原子がまったく同じでも、その性質がまったく異なるものになることがあるのはご存じでしょう。こうした問題は、大きな広がりをもっていて、少し古いですがマルティン・ガードナーの「自然界における左と右」など大変面白い本も書かれています¹⁾。今回は、光の世界で最近話題となっている新しい「左手系マテリアル」の世界を Web を通して眺めてみましょう。

1. 光の世界の右手・左手

さて、われわれ光の世界でもこうした類別はそれなりにあって、例えば円偏光、物質の旋光性などで右手系・左手系の区別が議論されます。とはいっても、これは条件次第で決まることで、特に人間世界のような不便なことは生じません。ところが、光の世界でも電磁波である光の伝搬については、大変不公平なことに(?)右手系の法則で縛られています。つまり、マクスウェルの方程式より導かれる光の伝搬する方向、つまりエネルギーについてはポインティングベクトル S の向き、等位相面の移動については波動ベクトル k の向きは、必ずしも一致はしませんが、その方向は電場ベクトル E と磁場ベクトル H に対して右手系の方向を向いているのです(図1(a)参照)。このことは、電磁波の発生が電荷の振動に起因することからくるわけですが、 $S = E \times H$ の右手系の関係はわれわれの住む物理世界では絶対です。しかし等位相面の伝搬方向を支配する波動ベクトル $k = 2\pi n / \lambda_0$ の向きは、屈折率ベクトル n により影響を受けます。このことが、屈折率異方性をもつ結晶中などで光エネルギーの流れる向きと、波面法線の向きに偏差が生じる理由となっています。さて、上記の屈折率ベクトルが通常と完全に逆方向の向きをもつとした

ら、つまり屈折率が負の値をもつとしたら、どのようなことが起こるのでしょうか？ この場合には、数学的には S と k は全く逆の方向に進むことが簡単に予測できます。そしてこの場合、図1(b)のように波動ベクトル k と電場・磁場の関係は「左手系」となることもおわかりになると思います。こうした状況での光波の伝搬の様子はアニメーション [<http://www.utexas.edu/research/cemd/nim/Agif/ModWave.html>] などでよく理解できます。

2. 左手系マテリアル

こうした媒質は、われわれの自然には存在しないのですが、頭の中で仮想的にテストすることは可能です。旧ソ連邦の物理学者 V. G. Veselago は、こうした問題を 1968 年の論文の中で取り扱い、そこで誘電率 ϵ と透磁率 μ が同時に負となる媒質では、屈折率 $n = \sqrt{\epsilon\mu}$ も負となりえることを示し、またそうした状況でも電磁波の伝搬は可能であることを示し、上記の理由でこうした媒質を「左手系物質」(left-handed substances) とよびました²⁾。また、左手系物質での光波の振る舞いは通常の場合と大きく異なることを示しました。例えば、板状の左手系物質の界面ではスネルの法則に従って光線は負の屈折を示し、図2に示すような媒質中と媒質外の2か所で集光をするような現象が生じたり、ドップラー効果やチェレンコフ放射が通常と逆の特性を示すことなどが予測されています。通常の媒質でも、貴金属や磁性体ではある周波数においては ϵ または μ が負の値を示す状況が存在しますが、それらが同時に生じる物質は自然界にはありません。そのため、Veselago のアイデアは、30年間テストされることはありませんでした。

3. Pendry の再発見

ところが1999年になって、英国インペリアルカレッジの J. B. Pendry が、通常の導電体でできた入れ子になった逆C字型の共振器構造(split-ring resonator: SRR)がマイクロ波の領域で磁性的性質を示し、しかもある周波数領域で負の値をもちうることを理論的に示し、また同時に針状の導電体構造が負の誘電率を示すことも併せて示しました³⁾。これに触発された米国カリフォルニア大サンディエゴ校の D. R. Smith らのグループは、プリント基板上に

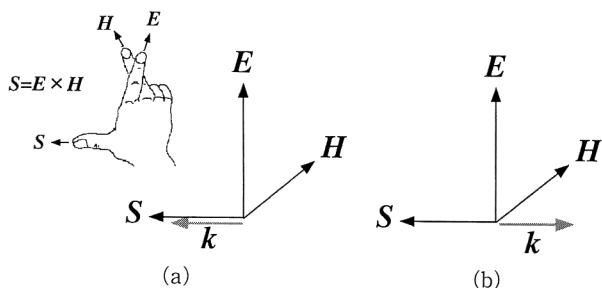


図1 電磁波伝搬における右手系・左手系, (a) 右手系の光波の伝搬 $n > 0$, (b) 左手系の伝搬 $n < 0$.



図3 SRRで構成されたメタマテリアル。

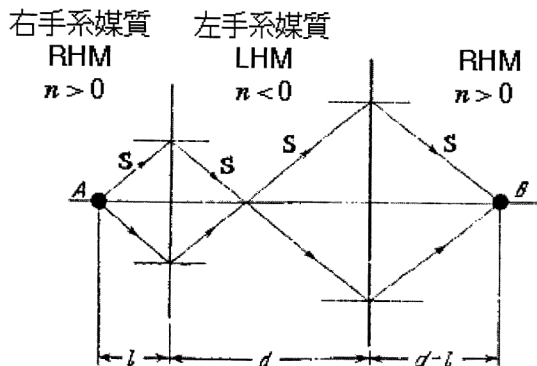


図2 Veselago のオリジナル論文により示された左手系メタマテリアルにおけるダブル・フォーカス現象。

パターンニングした SRR 構造と棒状導電体をブレードボード上に同期的に並べた構造を作成し (図 3), この構造が 10 GHz の周波数帯の一部で負の屈折率を示すことを実験的に確かめ, 負屈折率媒質 (negative refractive index material) が人工的に作成できることを明らかにしました。彼らはこの複雑な結晶状の構造をメタマテリアル (metamaterial: meta は beyond の意) とよび, その後プリズム型のメタマテリアルを用いた実験により負の屈折現象が生じることも示しました⁴⁾。この様子は, 彼らのホームページで簡潔な説明と写真で紹介されています [http://physics.ucsd.edu/lhmedia/]。この実験結果だけでも十分刺激的だったのですが, さらに 2000 年に Pendry が提唱した考えは, より驚異的なものでした⁵⁾。彼は, Veselago のアイデアを再度理論的に検討し, 負屈折率媒質スラブが近接場光を増幅し, それをを含む完全像形成 (perfect imaging/super lens) を行える可能性の提案を行ったのです。しかも, 銀の極薄膜が光周波数領域で透磁率が負でなくとも, 同様の作用を示すことも予測しました。

4. 左手系論争

前置きが長くなりましたが, この新しい「左手系メタマテリアル」の実在について, 最近では珍しい論争が物理学界に

巻き起こりました。そのためか, この話題に関連したインターネット上の情報もここ数年で激増しています。ここではもう少し, いまだホットなこの論争についての全体的経緯の把握や現象の直感的理解の助けとなるビジュアルなサイトを中心に旅をしてみましょう。

まずは, この論争を端的に紹介している Physics World の記事 [http://physicsweb.org/article/world/15/8/8/1] を見てみましょう。一見, 常識に反するような Pendry, Smith らの理論・実験結果には当初 (2000~2001 年) において多くの反論がわき起こりました。この記事のタイトルは “Negative reaction to negative refraction” と韻を踏んだなかなか気の利いたものとなっています。反論の代表的なものは, Smith らの負屈折実験そのものに疑問を呈するものから, Pendry の super lens の原理的实现性について反論するものまでさまざまですが^{6,7)}, 多くの反論に対して Pendry が理論面からきめ細やかに反証しています。これらを含む Pendry の論文の多くはインペリアルカレッジの彼のホームページ [http://www.cmth.ph.ic.ac.uk/photronics/] から参照できます。理論家である Pendry らしく地味なページですが, 彼の理論計算のベースとなっている Transfer Matrix 法のサンプルソースも入手可能で, 彼の広範な興味の対象もうかがえます。

反論派の中で米国テキサス大オースティン校の P. M. Valanju らの反論が根強く, 負屈折では光速を超える波面の転換が必要なのは, とか, 位相波面では負屈折は生じても群速度面は通常の屈折となるなどの彼らの主張について, 多くのグラフィカルな動画を示して抵抗しています (図 4 参照) [http://www.utexas.edu/research/cemd/nim/index.html]。彼らはまた, Smith らの実験結果における負屈折の観察は, 観測面がメタマテリアルの近傍電場の観測であるため他の要因による擬似信号を見ているのではないかと疑っていますが, この点については最近, マサチューセッツ工科大およびロッキードのグループが

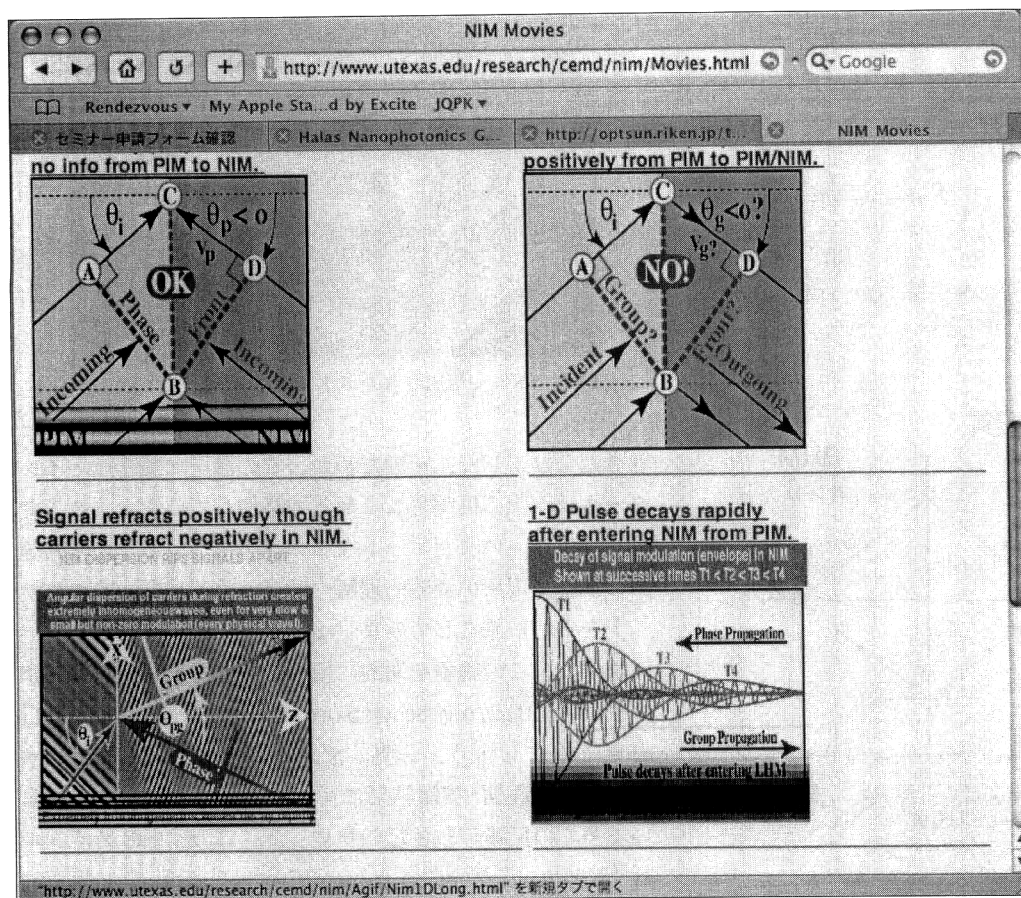


図4 負屈折現象にさまざまな角度から反論を加える米国テキサス大学の P. M. Valanju らのグラフィカルなページ。動画や関連リンクがたくさんあり、左手系の世界を理解するのにも助けとなる。彼らは左手系材料 (LHM) ではなく、負屈折媒質 (negative refraction material: NIM) という用語を支持している。

類似の実験をより注意深く遠方での観測で行って成功したことから、少なくともマイクロ波領域での負屈折現象は実験的には確認されたように感じます⁸⁾。このあたりの流れは Nature の記事 [http://www.nature.com/cgi-taf/DynaPage.taf?file=/nature/journal/v420/n6912/full/420119a_fs.html: "Negative refraction: A lens less ordinary"] や Physics Web の [http://physicsweb.org/article/world/16/5/3] などを参照されるとよくまとまっています。また、カナダ・トロント大では Smith とは異なる原理でマイクロ波領域でのメタ材料を作成し実証実験を行っています。[http://www.waves.utoronto.ca/prof/gelefth/metamaterials/UofTMetamaterials.html]。このように、マイクロ波領域での実験的、理論的研究は、新しい電波デバイス・アンテナ構造の実現を目指して、メタ材料のキーワードのもと進展が著しく、これらの研究の概要の把握、リンクなどはメタ材料研究の総本山ともいえるカリフォルニア大サンディエゴ校のホームページ [http://physics.ucsd.edu/~drs/left_home.htm] から、たどることができます。またここは、これまでの発表・未発表の関連の研究成果についてのデータベースとし

てもきわめて有用です。

さて、このあたりで誌面がつかまりました、次回は、光学の世界に生きるものにとってはより興味のある、完全結像の話題などについても見ていきましょう。

この記事に関するお問い合わせは、kato@optsun.riken.jp もしくは ura@dj.kit.ac.jp までお寄せください。

文 献

- 1) マルティン・ガードナー：自然界における左と右（紀伊國屋書店、1971）。
- 2) V. G. Veselago: Sov. Phys. Usp. Engl. Transl., **10**, 4 (1968) 509-514.
- 3) J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins and W. J. Stewart: IEEE Trans. Microwave Theory Tech., **47** (1999) 2075.
- 4) R. A. Shelby, D. R. Smith and S. Schultz: Science, **292**, (2001) 77-79.
- 5) J. B. Pendry: Phys. Rev. Lett., **85**, 18 (2000) 3966-3969.
- 6) P. M. Valanju, R. M. Walser and A. P. Valanju: Phys. Rev. Lett., **88**, 18 (2002) 18740.
- 7) N. Garcia and M. Nieto-Vesperinas: Phys. Rev. Lett., **88**, 20 (2002) 207403.
- 8) A. A. Houck, J. B. Brock and I. L. Chuang: Phys. Rev. Lett., **90**, 13 (2003) 137401.