

前回では左手系マテリアルをめぐるホットな議論と、マイクロ波領域における検証に関するサイトを紹介してきました。屈折率が負の物質が身近になれば、光の世界もいっそうバラエティーに富んだものとなりそうで、わくわくしますね。

## 5. Superlens はできるか？

Veselagoにより予言された負屈折率媒質における光の特異な振る舞いのひとつは、板状の負屈折率媒質が点光源に対して2回の集光現象を示しうる（ダブルフォーカス）ということでしたが、この点はメタマテリアルを使ったマイクロ波領域の実験やシミュレーションで確認されています。前回紹介したカナダ・トロント大のページでのL-Cベース（要するにコイルとコンデンサで作ったマトリクス）のメタマテリアルによる実験例<sup>1)</sup>や（図1）、最近Photonics Newsなどに紹介されたマサチューセッツ工科大（MIT）のグループによる検証実験 [<http://www.photonics.com/spectra/research/XQ/ASP/preaid.121/QX/read.htm>] などが参考となるでしょう。

さて、こうした集光現象が本当にPendryのいう‘superlens’につながるかどうかについては、まだ完全には証明されたとはいえない状況です。特に、われわれにとって興味のある光周波数領域で近接場が増幅され完全結像が実現されるかどうかは、実験的検証はなかなか難しいように思われます。そのためこの点については、有限時間差分(FDTD: finite-difference time-domain)法を用いたシミュレーションによる検証が数多く行われていますが、いまだ賛否両論があるようです。例えば米アリゾナ大ツーソン校のR. Ziolkowskiは、誘電率と透磁率両者について分散性媒質を定義可能としたFDTDを開発し、両者が負の場合の電磁波伝搬について検討しています<sup>2)</sup>。その例がPowerPoint書類として公開されています [<http://online.kitp.ucsb.edu/online/qo02/ziolkowski/>]。こうした改良FDTDを用いた負屈折媒質のシミュレーションは、英ロンドン大などで [<http://www.elec.qmul.ac.uk/staffinfo/yang/yanghao/lhms.html>] 数多く行われており、商用パッケージでもそれに適したものが出始めました [<http://www.remcominc.com/>]。しかし、完全結像現象はロスの

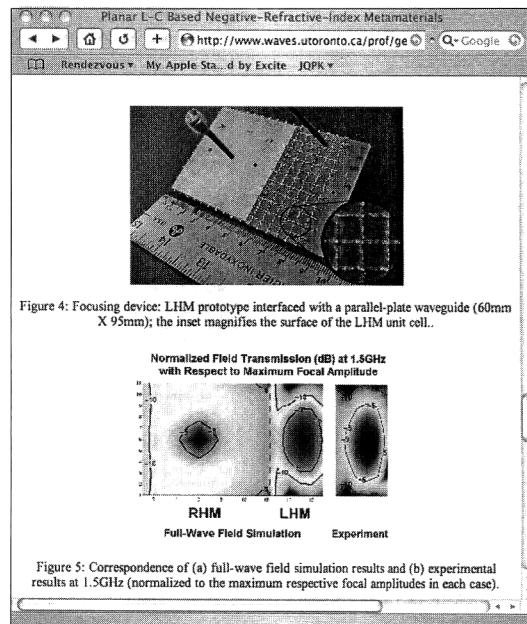


図1 トロント大で作成されたメタマテリアルとそれを用いた負屈折によるフォーカシング現象。

ない限られた状況でしか期待できず、バルクの媒質を用いた光領域での実現性にはまだ疑問符がついているように思われます。

これに代わるものとして議論されているのは、フォトニック結晶による負屈折現象の利用の可能性です。深い変調度をもつフォトニック結晶がすべての波数ベクトル方向に對して負屈折現象を示しうることは、NTT物性科学基礎研究所の納富氏により1998年ごろ示され<sup>3)</sup>、当時東北大とNECの共同研究により作成されたフォトニック結晶における「スーパークリズム」現象とともに注目されました。この現象は納富氏の研究グループのページ [<http://www.brl.ntt.co.jp/group/shitsubi-g/project5.htm>] でわかりやすく説明されていますが、最近の左手系マテリアル研究の展開とともに再認識されています。

その延長線上でさまざまな構造や屈折率条件下におけるフォトニック結晶による完全結像の可能性が米MITのJ. Joannopoulosのグループ [<http://ab-initio.mit.edu/photons/index.html>] や、米ノースイースタン大のS. Sridharらにより研究されています<sup>4,5)</sup>。Sridharのページ [<http://sagar.physics.neu.edu/>] では、フォトニック結晶

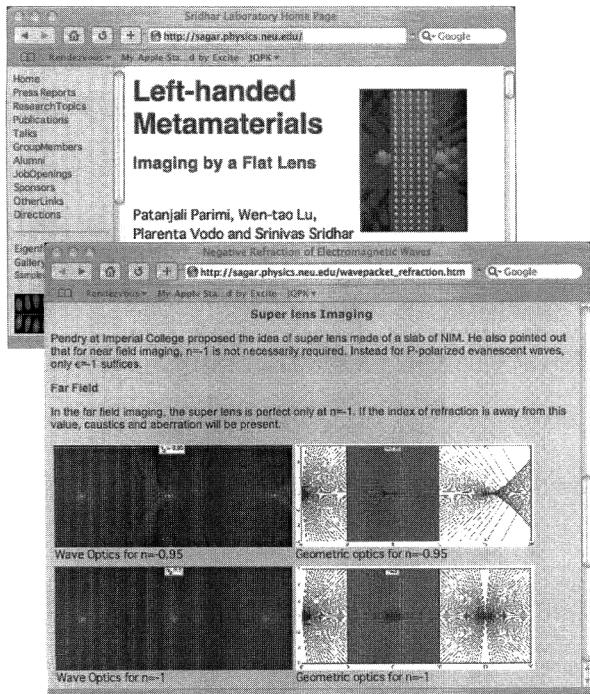


図2 ノースイースタン大 Sridhar らのページ。負屈折媒質でのいろいろな電磁波伝搬の美しいシミュレーション結果を見ることができる。

による完全結像のシミュレーション結果や、さまざまな条件下での負屈折現象の数値計算結果が美しいグラフィックスで示されていて一見に値します（図2）。

こうした数値計算では、「superlens」の可能性が示されているわけですが、上記のようなフォトニック結晶の作成技術が向上して、光周波数領域で完全結像の検証実験が行われるのが楽しみです。もちろん Pendry が主張する貴金属極薄膜スラブや多層膜構造による結像現象も、表面プラズマ波が関与した上記とは様相の異なる興味深い現象ですが、今のところ Web 上では実験的アプローチについての情報はみあたりません。

## 6. 新しくて古い？

最後に、ごく最近の話題と古い話題に目を向けてみましょう。これまで述べた左手系マテリアルの研究では、媒質そのものの物理的性質を人工的にコントロールすることを指向したメタマテリアル研究がメインでした。それに対してもう一方で、米国立再生エネルギー研究所の Y. Zhang らは、異なる向きの結晶軸をもった  $\text{YVO}_4$  結晶の接合界面で可視光ビームに対し負屈折現象が生じることを示しました<sup>6)</sup>。この現象は、左手系マテリアルが光周波数領域で実現された、というわけではないのですが、われわれの目に見える形で負屈折現象が示され [http://www.aip.org/mgr/png/

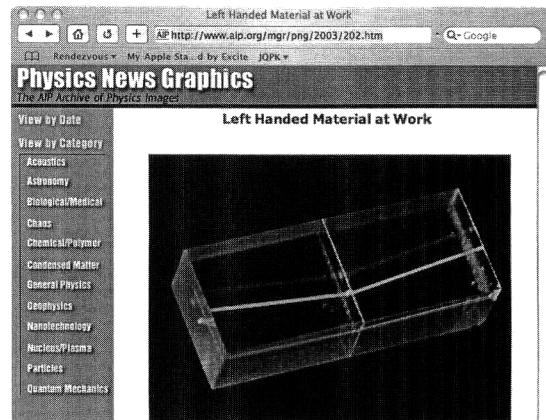


図3 互いに45度傾いた結晶軸の  $\text{YVO}_4$  結晶の接合界面での負屈折現象（青、緑のビームが見える）。

2003/202.htm]（図3参照），こうした現象の身近な応用が近づいたという点で注目に値します。今後の展開が楽しみです。

さて、古い話題についてですが、Web をいろいろたどっていると、Veselago 以前から「負屈折率」について言及されているという情報も散見しました [http://www.wave-scattering.com/negative.html など]。遡ると 1904 年にすでに backward waves として、こうした現象または媒質の存在が議論されていたそうです。よく調べるものだと感心しました。こうした情報が簡単な検索で得られるようになったのはインターネットのたまものですが、電磁波の伝搬の基礎に関連したこの分野では、過去の研究を注意深く調べるとまだまだ意外な事実が掘り出されるかもしれません。

長くなりましたが左手系マテリアルの Web の旅、いかがでしたでしょうか。右利きのあなたもそろそろ左利きに変えてみませんか？

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。

（理化学研究所 加藤純一）

## 文 献

- 1) A. K. Iyer, P. C. Kremer and G. V. Eleftheriades: Opt. Express, **11** (2003) 696–708.
- 2) R. W. Ziolkowski and E. Heyman: Phys. Rev. E, **64** (2001) 56625.
- 3) M. Notomi: Phys. Rev. B, **62** (2000) 10696.
- 4) C. Luo, S. G. Johnson, J. D. Joannopoulos and J. B. Pendry: Phys. Rev. B, **65** (2002) 201104.
- 5) P. Parimi, W. T. Lu, P. Vodo and S. Sridhar: Nature, **426** (2003) 404.
- 6) Y. Zhang, B. Fluegel and A. Mascarenhas: Phys. Rev. Lett., **91** (2003) 157404.