

電磁メタマテリアルの基礎と最近の展開

萩行正憲

大阪大学レーザーエネルギー学研究センター

Fundamentals of electromagnetic metamaterials and their recent progress

M. Hangyo

Institute of Laser Engineering, Osaka University

Metamaterials are artificially structured materials made of structure units much smaller than electromagnetic wavelengths, which have effective electric permittivity and magnetic permeability not realized by natural materials. This concept appeared in 21th century and the research activity is growing very rapidly. Metamaterials with negative permittivity and permeability can be realized, which show negative refraction. In this paper, the fundamentals of metamaterials and their recent progress are reviewed mainly in the terahertz frequency region.

1. はじめに

最近、メタマテリアルという言葉がよく聞かれるようになってきた。メタ・・・というとなんとなく怪しげな雰囲気があるが、確かにメタマテリアルは怪しいコンセプトである。なにしろ、屈折率が負になったり、平板が完全レンズになったり、透明マント(隠れ蓑)が実現されてしまうということで、通常の光学からは想像もできないワールドが出現する[1-3]。現在は、メタマテリアル研究は古典電磁気学を土台とするものが主体で、量子物性を主な対象とする光物性物理学研究者からは、「所詮マクスウェル方程式からすべて導かれるもので新しいことはない」というご批判もあろうかと予想するが、そうでもないというのが筆者の思っているところである。

メタマテリアルとは、波長よりも十分小さな構造ユニット(メタ原子)を並べて、有効誘電率や有効透磁率を自由に制御しようとするものである。これは今世紀に入ってから出現したコンセプトであるが、上記のような奇妙な現象が起こることから、またたく間に大流行分野に成長した。しかし、残念ながら我が国では組織的なメタマテリアル研究が出遅れ、本年漸く、科研費新学術領域「電磁メタマテリアル」がスタートした。ただ、マイクロ波分野では、伝送

線路型メタマテリアルの創成期にその拠点であった UCLA の伊藤研究室に多くの日本人が留学し、そのアクティビティを我が国に持ち帰り、実用デバイスへの応用研究が盛んになされている。

2. メタマテリアルとは

図 1 に、横軸に比誘電率(ϵ_r)、縦軸に比透磁率(μ_r)をとった平面を示す。とりあえず、両者とも実数であるとする。テラヘルツより高周波では、通常、比透磁率は1で、誘電率もわずかな範囲にしか自然界の物質は存在しない。つまり我々は図の第1象限の $\mu_r = 1$ の直線の一部しか利用していない。金属は誘電率が負で、バルクな電磁波

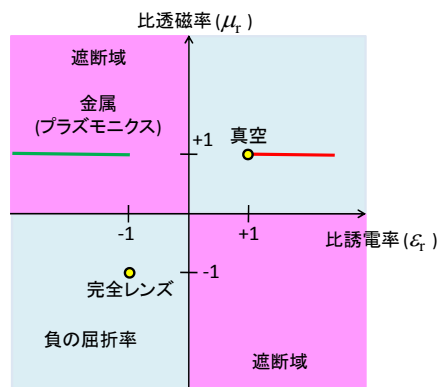


図 1 誘電率-透磁率平面

は伝播できないが、表面波(表面プラズモンポラリトン、SPP)が存在し、これを利用するのが第2象限のプラズモニクスである。電磁波の屈折、速度、波長を支配するのが屈折率 n で、

$$n = \sqrt{\epsilon_r} \sqrt{\mu_r} \quad (1)$$

で表わされる。一方、比較的知られていないが、反射率は波動インピーダンス

$$z = \sqrt{\mu_r / \epsilon_r} \quad (2)$$

で定まる。しかし、 $\mu_r = 1$ の場合、屈折率が決まれば、波動インピーダンスも決まってしまう、高屈折率物質は必然的に高反射率となってしまう。しかし、誘電率と透磁率が独立に制御できれば、高屈折率で無反射の物質を実現できる。このことだけを考えても、光学設計手法が全く変わってしまうことが理解できる。

ロシア(ソ連)の Veselago は、1960 年代末に誘電率と透磁率が同時に負の場合(図 1 の第 3 象限)に何が起こるかを考えた[4]。彼の結論は驚くべきもので、このような物質に入射した光は、図 2 (a)に示されるように、普通の物質とは異なり、「くの字」に折れ曲がるのが予想された(このことから、負の屈折率物質、NIM、と呼ばれる)。これは、図 2 (b)に示されるように、 \mathbf{k} 、 \mathbf{E} 、 \mathbf{H} が通常と異なり左手系をなし、位相の進行方向とエネルギーの進行方向が逆にな

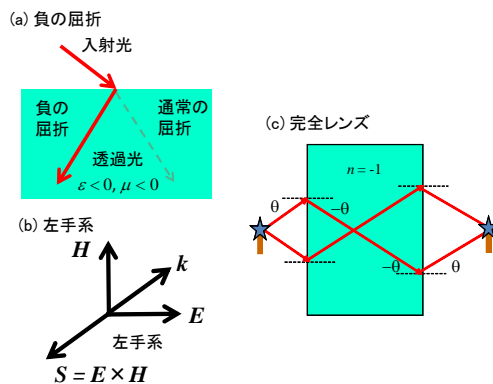


図 2 (a) 負の屈折、(b) 負の屈折率物質における \mathbf{k} 、 \mathbf{E} 、 \mathbf{H} の関係、(c) 平板による完全レンズ。

るからである(このため、NIM は左手系物質、LHM、とも呼ばれる)。さらに、 $n = -1$ の場合、平板が回折限界を超えた完全レンズになることも予想された。しかし、このような物質は自然界では見出されず、Veselago の研究は、永い間忘れられていた。しかし、前世紀の終わりから今世紀始めにかけて、Pendry らによって金属でできた分割リング共振器(SRR)が磁気的な応答を示し[5]、さらに Smith らによって、金属ワイヤーを追加した系では、誘電率と透磁率が同時に負になることが示された[6,7]。

まず、磁気応答を如何に実現するかが鍵であるが、これは、図 3 (a)のような金属でできた SRR で可能である。この要素(メタ原子と呼ぶ)は、LC 共振回路とみなすことができ、リングを入射電磁波の磁場が貫くとき電磁誘導で起電力が生じ、周回電流が流れる。これが、磁気モーメントを生成する。つまり磁気応答が現れる。共振周波数より高周波の狭い周波領域では反磁性となり、 μ は負となる。また、図 3 (b)のような金属ワイヤーを並べたものは、その構造で決まる有効プラズマ周波数以下で、プラズマのように誘電率が負になる。Smith らは、図 3 (c)のように、この 2つの構造を組み合わせて、マイクロ波領域で負の屈折を実現した[6,7]。

マイクロ波領域では、メタ原子の大きさはミリからセンチオーダーで、プリント基板上にエッチングで作ることができるが、テラヘルツ、赤外、可視領域では、ミクロンからナノになり、リソグラフィや FIB などの高度な加工技術が必要となる。特に、可視領域では、ナノ加工に加えて、金属のジュール損失が大きくなる問題があり、その実用化までの道りはかなり遠いと予想される。しかし、まだ 2次元の段階ではあるが、構造の単純化などにより光領域下端のメタ材料が実現されている。さらに 3次元化への挑戦が続けられている[8]。テラヘルツ領域では、メタ原子のサイズは数十ミクロンで、かつ、全体のサイズは数ミリでよいので、最もメタ材料開発に適している。実際、これまで偏光子

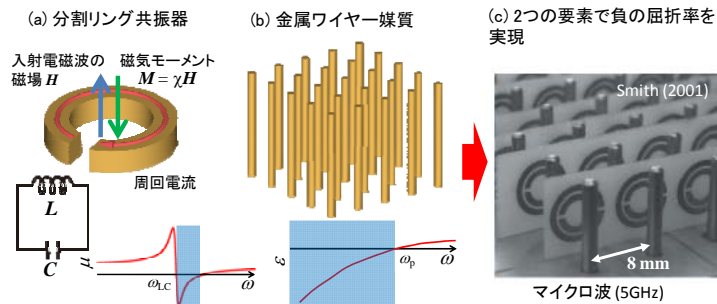


図3 (a) 分割リング共振器、(b) 金属ワイヤー媒質、(c) マイクロ波領域のメタマテリアル。

やフィルターとしてそれぞれ使われてきたワイヤーグリッドやメタルメッシュは、メタマテリアルとみなすことができる。

以下では、筆者らが研究しているテラヘルツ領域のメタマテリアルについて紹介する[9]。

3. テラヘルツメタマテリアル

図4は、シリコン基板上に作製したSRR配列、および、比較のために作製した閉リング共振器(CRR)配列である[10]。作製には、ミクロンオーダーの金属線をフォトマスクなしで作製可能な超微細インクジェット(SIJ)プリンタを用いている[11]。この装置は非常に強力で、5ミリ角程度の領域に2500個のメタ原子を描くのにわずか数

時間しか要しない。ナノペーストインクで描画後に、220°Cで1時間熱処理すれば、テラヘルツ領域でも十分な伝導度の金属となる。さらに、立体的なメタ原子もある程度作製でき、レジスト膜で絶縁することにより多層のメタマテリアルの作製も可能である。

SRR配列では、B偏光の場合に0.4 THzに鋭い透過のディップが現れる。これは、右端の図にあるように、リングにギャップがあることによって両アームに流れる電流が非対称になり、結果として周回電流が流れて、リングに垂直に磁場が生成されることに対応している[12]。この周波数は、リングのLC共鳴周波数である。この共鳴は、電場が磁場を生成する現象で、電場誘

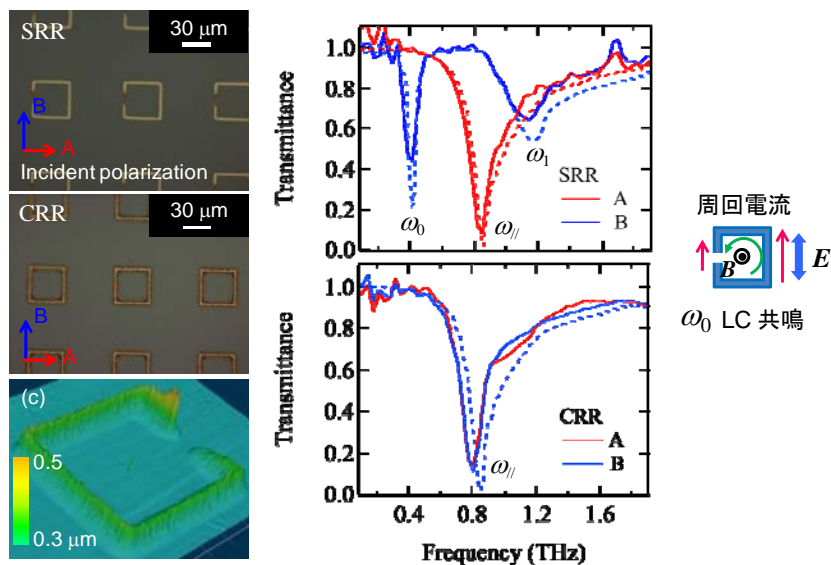


図4 SRR配列およびCRR配列メタマテリアル試料の写真と、テラヘルツ領域の透過スペクトル。実線は実験、点線はFDTDシミュレーションの結果である。

起の磁氣的共鳴と呼ばれている。この配置では、磁場はリングを貫いてはいないので、純粋な磁氣的応答ではないが、フレキシブルシート上に作製した SRR 配列を積層したバルクな試料で、磁場がリングを貫く配置で、純粋な磁氣応答が観測されている [13]。このディップの周波数付近で、負の透磁率が実現されている。なお、比較のために作製した CRR 配列ではこのディップは完全に消滅する。

負の誘電率は、金属ワイヤー配列で実現されるが、このワイヤー配列は面白い周波数特性を示す [14]。すなわち、ワイヤーに周期的あるいはランダムにカットを導入すると、その有効複素誘電率(あるいは、有効複素電気伝導度)は、ドローデ金属的な振る舞いから、高誘電率の絶縁体的なそれに変化する。そのスペクトル形状は、導電性高分子の複素誘電率のスペクトルが、試料の質によって金属-絶縁体転移的に変化するときの様子とそっくりである。つまり、ワイヤー配列は、高分子の複素誘電率をまねるメタマテリアルとみなすことができる。なお、テラヘルツ領域では、図 3 (c) のような SRR とワイヤーを組み合わせた負の屈折率物質はまだ実現されていない。

4. まとめ

メタマテリアルの基礎的なことがらと、最近の筆者らのテラヘルツ領域のメタマテリアル研究について紹介した。

メタマテリアル分野の興味は、図 1 の第 3 象限のみならず、自然界の物質では得難い領域、例えば、誘電率がゼロの物質(ENZ と呼ばれる)など、誘電率-透磁率平面全体に広がっている。電場が磁氣分極を誘起し、磁場が電気分極を誘起するような奇妙な人工物質(bianisotropic material と呼ばれる、マルチフェロイック物質に類似)にも興味が持たれ、このような物質では、片方の円偏光に対して全く透明な物質を作製することも可能であることが示されている。また、音波や地震波に対するメタマテリアルなども考えられており、さらに、量子物性と組み合わせた量子メタマテリアルは、最

近の Zheludev の Science 誌での解説で、メタマテリアルの樹木図の最上位に位置付けられている [15]。つまり、光物性の中にも、メタマテリアルの概念が今後浸透していくと予想される。多くの方のこの分野への参入を期待したい。

謝辞

ここで紹介した研究の一部は、科研費基盤研究(A)および新学術領域研究「電磁メタマテリアル」の助成を受けています。ここに感謝いたします。

参考文献

- [1] 石原照也監修, メタマテリアル -最新技術と応用- (シーエムシー出版, 2007).
- [2] S. A. Ramakrishna and T. M. Grzegorzczuk, *Physics and Applications of Negative Refractive Index Metamaterials* (SPIE Press, Washington, 2009).
- [3] 北野正雄, 応用物理 **78**, 503 (2009).
- [4] V. G. Veselago, *Sov. Phys. Usp.* **10**, 509 (1968).
- [5] J. B. Pendry *et al.*, *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.* **47**, 2075 (1999).
- [6] D. R. Smith *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **84**, 4184 (2000).
- [7] R. A. Shelby *et al.*, *Science* **292**, 77 (2001).
- [8] W. Cai and V. Shalaev, *Optical Metamaterials* (Springer, New York, 2010).
- [9] 萩行正憲、宮丸文章, 応用物理 **78**, 511 (2009).
- [10] K. Takano *et al.*, *Appl. Phys. Express* **3**, 016701 (2010).
- [11] (株)SIJ テクノロジ (<http://www.sijtechnology.com/>).
- [12] N. Katsarakis *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **84**, 2943 (2004).
- [13] F. Miyamaru *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **96**, 081105 (2010).
- [14] K. Takano *et al.*, *J. Appl. Phys.* **107**, 024907 (2010).
- [15] N. I. Zheludev, *Science* **328**, 582 (2010).