

知っておきたいキーワード

メタマテリアル

田中拓男[†]

[†] 独立行政法人理化学研究所 基幹研究所 田中メタマテリアル研究室

"Metamaterials" by Takuo Tanaka (Metamaterials Laboratory, RIKEN Advanced Science Institute, Saitama)

キーワード：メタマテリアル，完全レンズ，光学迷彩，2光子還元

まえがき

メタマテリアルとは、ナノサイズの金属構造を用いて人工的に新奇な電磁学的特性を付加した擬似物質です。

メタマテリアルのメタは「超」を意味する接頭語です。メタマテリアルを利用すると、光の磁場成分に直接応答する物質など、自然界に存在する物質にはあり得ない特性を持つ物質を作り出

すことができます。本稿では、メタマテリアルで実現できる完全レンズや光学迷彩に加え、3次元メタマテリアルの加工法である2光子還元法を紹介します。

メタマテリアルとは

物質の屈折率 n は、比誘電率 ϵ_r と比透磁率 μ_r という二つの物理量の平方根の積で定義され、

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

で与えられます。しかし、光に対する物質の μ_r の値はほとんどすべての物質において1.0です。これは、物質が光の磁場成分と相互作用しないことを意味します。可視光のような周波数の高い電磁波に対しては、物質の磁性の起源である荷電粒子のスピンの磁気モーメントや軌道磁気モーメントが、磁場の高速な変化に追従できないからです。

その結果、物質の屈折率は μ_r の自由度を失って、比誘電率 ϵ_r だけで決まり、式(1)も

$$n = \sqrt{\epsilon_r} \quad (2)$$

と簡略化されます。

図1のように、物質の ϵ_r と μ_r を横軸と縦軸にとった二次元空間を考えます。レンズなどの光学素子を設計する立場からすれば、さまざまな屈折率をもったパラエティ豊かな物質が手にはいれれば、設計の自由度が高くなります。ところが、先に述べたように、光の世界では、ほとんどすべての物質の μ_r が1.0なので、図に示すように、物質は一本の直線上にのみ存在していて、

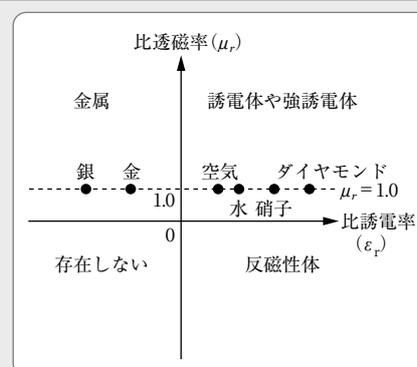


図1 物質の電磁気学的特性

そのパラエティは小さいものになっています。

この制限を破って、 μ_r が1.0から変化した物質をつくり出すには、何らかのカラーリを導入して、光の周波数で変化する磁場に応答できる「磁性」を人工的に物質に与えなければなりません。

これを実現するために、図2に示すように、微小な金属のリングをつくり、これを母体となる物質中に集積化する手法が考案されています。

この金属リングは、物質中の電子の軌道運動を模倣するためのものです。金属リングに外部から光を照射して変動磁場を印加すると、電磁誘導の原理で金属リングの中の自由電子が振動し、自由電子の円環状の振動は新たな磁場を作り出します。さらに、金属リングに適当な切れ目を入れると、これがコンデンサとして働いて、金属リングがLC共振回路となり、その共振周波数の光と強い共鳴相互作用を起こし

ます。

その結果、この多数の金属リングのできた構造体は光にとっては、磁場成分と相互作用する均質な新しい物質として動作します。そして、この物質の巨視的な比透磁率が1.0から変化します。これが人工的に磁性を制御したメ

タマテリアルです。

同様に、金属構造の形を変えると、誘電率を制御することも可能です。このように、「人工的に導入した構造によって物質の電磁気学的(光学的)特性を制御した擬似物質」が、メタマテリアルです¹⁾²⁾。

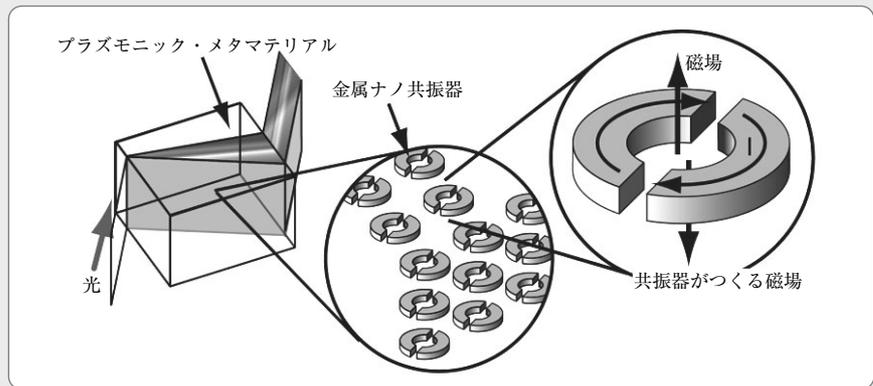


図2 メタマテリアル

負屈折率物質と完全レンズ

光学顕微鏡への絶えない要求の一つは、「いくらでも小さな物(構造)を観たい」ということです。しかし、光の波動性のために、その波長より小さな構造の像はつくれないと結論されています。しかしこれは正確には正しくありません。

光を物体に当てると、その物体の形(構造)を反映した反射光や透過光が生成されます。これらの光の中には、波長より細かな構造の情報を持ったものも存在します。しかし、このような光は物体から離れるにつれて指数関数的に減衰するエバネッセント場なので、空間を伝搬できません。すなわち、波長より細かな構造の情報を持つ光が存在しないのではなく、そのような情報を含む光は空間を伝播できないので、目に届かないだけなのです。

この問題に対して、2000年に英国のPendryが、「もし屈折率が負の値を持つ物質があれば、いくらでも小さいものを光で観察できるレンズが実現できる」と指摘しました³⁾。

このレンズのポイントは、図3に示すように、本来減衰するはずのエバネッセント場が負の屈折率物質に入射すると指数関数的に増幅され、エバネッセント場の情報が遠くまで届くようになることです。さらに、屈折率の符号が反転する物質の境界面では、光線は負の角度に屈折するので(図3(b))、負の屈折率物質はまるでレンズのように像

を結びます。この負の屈折率物質を利用した結像法が、完全レンズ(Peefect Lens)*1です。もちろん負の屈折率を持つ物質は、自然界には存在しません。そこで、メタマテリアルを用いて、このような物質を作りだそうという研究が精力的に行われています。

*1 通常のレンズでは不可能な、光の波長より小さい構造を見ることができるレンズ。

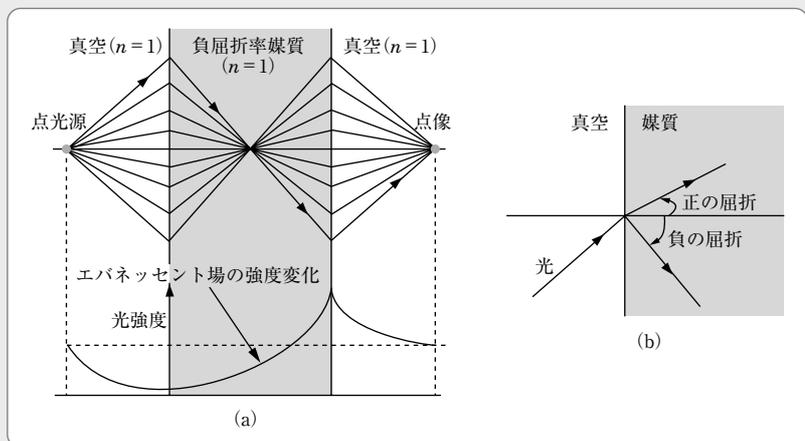


図3 完全レンズ

光学迷彩

「物体のあらゆる姿を見たい」という完全レンズとは反対に、「見られたくない」という要求を実現する技術も、メタマテリアルを利用することで実現できます。これは、一言で言えば「透明人間」を作り出す技術です。

そもそも物体の存在が目に見えるのは、以下の二つの原因があるからです。一つは後方から来る光を物体が遮って影ができるからで、もう一つは物体が光を反射、散乱させてその光が観測者に届くからです。もしこの二つの原因を取り除いてしまえば、物体は見えなくなります。そこで、特殊な屈折率分

布を持つ球殻を作って、それで物体のまわりを囲みます。この球殻は、**図4**のように、物体後方から来る光が物体に遮られないように、物体の横を迂回するように光を曲げる屈折率分布を持ちます。さらに、球殻の外表面の光学特性が、空気（真空）と同じ光学特性（正確には特性インピーダンス）になるようにすれば、光の反射も散乱もなくなります。こうすれば、その物体は球殻の外部から見えなくなります。この技術は、光学迷彩（英語では"Optical Cloaking"）と呼ばれています。

このような特殊な屈折率分布を持つ物体は、メタマテリアル技術を利用してはじめて実現可能となります。この

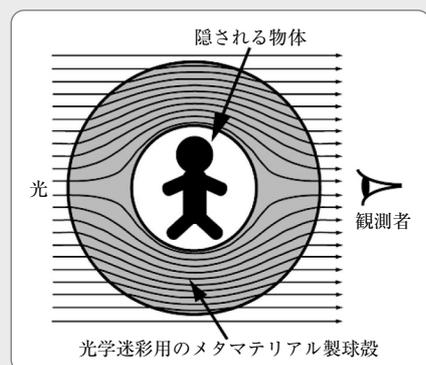


図4 光学迷彩

技術は、すでにマイクロ波領域において実験的検証が進められています。

2光子還元法

メタマテリアルが「マテリアル」と名乗る以上、本来その形態は、体積のある3次元的なものが求められます。しかし、一般にメタマテリアルの加工に利用される光リソグラフィや電子線リソグラフィ、ナノインプリント法といった微細加工技術は、基本的に2次元パターンの転写技術なので、立体的な3次元構造を加工することができません。そのため、現時点で報告されているメタマテリアルの構造は、平面状の2次元のものがほとんどです。この問題を解決するために開発した3次元金属構造の加工技術が、2光子還元法です。

2光子還元法では、金属を一旦イオンに変えて宿主材料中に分散させ、この金属イオンを極短パルスレーザーを照射した際に起こる2光子吸収過程を利用して、金属に還元します^{4) 5)}。

メタマテリアルで利用される金や

銀のイオンには、可視光から近赤外域にかけて光が透過する波長帯域が存在します。そこで、この透明な波長域にレーザーの波長を合わせれば、加工材料の内部深くにレーザースポットを形成させることができ、さらに物質が二つの光子を同時に吸収する2光子吸収過程を利用すれば、レーザーの集光点のみで金属イオンを還元させることができます*2（**図5**）。

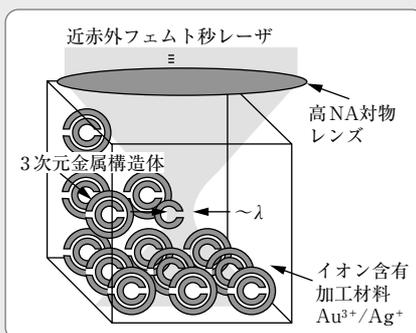


図5 2光子還元法

図6は、2光子還元法を用いて、ガラス基板上に作製した銀の3次元構造の電子顕微鏡写真です。4本の銀ロッドから構成されるピラミッド構造です。約100nmの線幅を持つ3次元金属微細構造が、波長800nmの光を使って加工できています。（2011年6月28日受付）

*2 2光子吸収過程は自然界ではほとんど起こりませんが、光子密度が高いレーザーの集光点で発生させることができます。

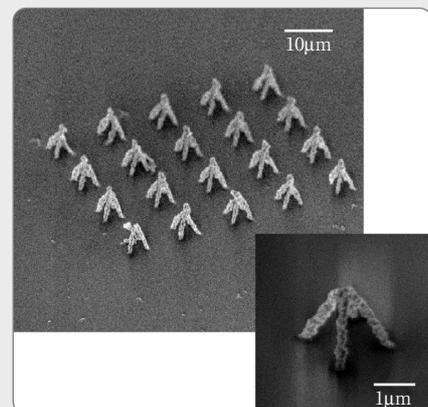


図6 2光子還元法で作製した3次元金属構造体

参考文献

- 1) 田中拓男, 応用物理, 75, pp.1476-1480 (2006)
- 2) A. Ishikawa et al., Phys. Rev. Lett., 95, 237401 (2005)
- 3) J.B. Pendry, Phys. Rev. Lett., 85, 3966 (2000)
- 4) T. Tanaka et al., Appl. Phys. Lett., 88, 81107 (2006)
- 5) Y. Cao et al., Small, 5, pp.1144-1148 (2009)



田中 拓男 1991年、大阪大学工学部応用物理学専攻卒業。1996年、同大学院工学研究科博士課程修了。1996年、大阪大学基礎工学部助手。2003年、理化学研究所研究員を経て、2008年より、理化学研究所田中メタマテリアル研究室准主任研究員。2010年より、北海道大学電子科学研究所客員教授。2011年より、埼玉大学連携教授を併任。プラズモニクメタマテリアルや3次元多層テラバイト光メモリーなどのナノフォトニクス、プラズモニクスの研究に従事。博士(工学)。