

人工媒質メタマテリアルと透明マント



研究室紹介

真田 篤志*

Artificial metamaterials and invisibility cloaks

Key Words : metamaterials, transformation electromagnetics, invisibility cloaks

はじめに

光や電磁波の波長に比べて十分小さい構造体を原子・分子に見立てて配列することで、例えば覆うと見えなくなる透明マントや、負の屈折率を持つ左手系媒質など、自然の材料が示さない特異な物性を持つ材料を人工的に構成することが可能です。このように構成した構造体は人工媒質あるいはメタマテリアルと呼ばれています (図1)。メタマテリアル研究は、電磁気学や光物性などの物理分野に加えて、これを実現するための微細加工技術や自己組織化技術、媒質設計や最適化のための数値計算技術、電波・光波領域の工学応用技術などの技術分野を跨ぐ学際領域で、近年世界中で注目され研究開発が急速に進んでいます。

本研究室では、透明マントや負の屈折率を持つ左手系媒質の実現をはじめとする、メタマテリアルによる様々な新奇物性の理論と応用に関する研究を行っています。本稿では、このうち本研究室で行った透明マントの開発例を紹介しましょう。

変換電磁気学と透明マント

相対論によれば、巨大な質量を持つ天体の周りでは空間が座標変換を受け、この空間に入射する光は座標系に従って反射・散乱されることなく曲がりま

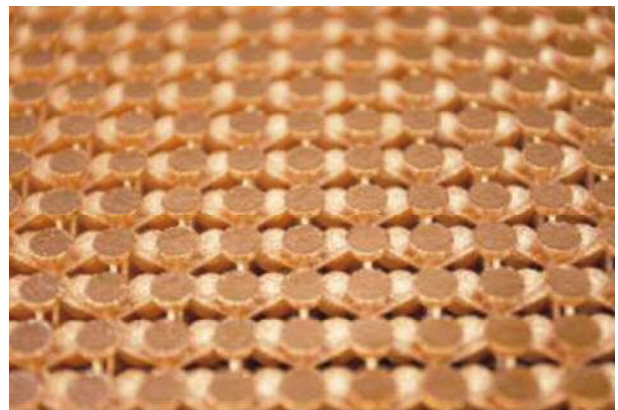


図1 メタマテリアル

す。これは、この座標変換に対してマクスウェル方程式が保存されているからで、実際にこの現象は重力レンズとして観測されています。もし、任意の座標変換に対してもマクスウェル方程式を保存することができれば、光をその座標系に従って自在に曲げることができるはずです。では、現実にもそのようなことが可能でしょうか？ 実は、これは座標変換をうける空間を、マクスウェル方程式を保存するのと等価な異方性媒質で満たすことで実現可能です。一般にはこの媒質は非対角項が非零の2階のテンソル媒質パラメータを持つ異方性媒質となり、自然の材料で実現することは困難ですが、人工媒質メタマテリアルであれば実現可能です。

このように座標変換と等価な媒質により光や電磁波を制御するという概念は変換電磁気学と呼ばれています。変換電磁気学の概念による光や電磁波の制御は、従来のレンズやミラーを用いたものに比べて極めて自由度の高い制御が可能で、新しい次世代の光の制御法として期待されています。

例えば、図2(a)のような球形の物体の周りを、同図(b)のような座標変換と等価なマクスウェル方程式を保存する媒質で囲ったとすると、この媒質に



* Atsushi SANADA

1967年3月生

岡山大学 大学院自然科学研究科 博士課程修了 (1994年)

現在、大阪大学 大学院基礎工学研究科 システム創成専攻 電子光科学領域 光エレクトロニクス講座 光波マイクロ波研究グループ 教授 博士(工学)

メタマテリアル

TEL : 06-6850-6305

FAX : 06-6850-6341

E-mail : sanada@ee.es.osaka-u.ac.jp

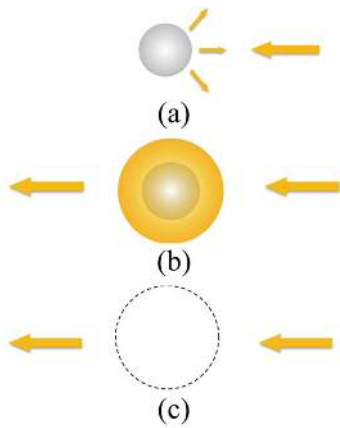


図2 透明マント

入射する光は、球の周りを迂回して内側の物体には到達することなく進みます。つまり、光は物体で散乱されません。よって、この光は同図 (c) のような物体がない空間を伝搬する場合と区別することはできなくなり、この球の内側にもものを隠すことができるわけです。これが変換電磁気学に基づく透明マントの原理です。

カーペットクロークの試作実験

本研究室で試作した、カーペットクロークと呼ばれる透明マントを紹介しましょう。カーペットクロークは、床に敷いてあるカーペットの下に物体を隠すタイプの透明マントです。

いま図3(a)のように、鏡面状の床にこぶがある場合を考えます。こぶに入射する光は通常こぶにより反射・散乱されますが、いま同図 (b) のようにこぶを適切な座標変換が施された透明マントでカーペットのように覆うことで、同図 (c) のこぶのない鏡

面によるものと全く同じ反射・散乱波を持たせることができます。光がどの方向から入射しても鏡面と同じ反射・散乱波を持つため、カーペットの下に物体を完全に隠すことができるのです。このタイプの透明マントがカーペットクロークです。

カーペットクロークの設計は次のような手順で行います。まず、図3(d) のようなこぶの上部の空間 (x', y') を考え、これが同図 (e) のような鏡面上の領域 (x, y) から座標変換されたものであると考えます。次に、この領域を微小セルに離散化し、それぞれのセルに対して、この座標変換に対してマクスウェル方程式を保存するのと等価な媒質の媒質パラメータを理論的に算出し、与えます。

まず、設計の妥当性を確認するため、この領域を通過する光の反射・散乱特性を理論的に計算しました。こぶに対して入射角を変化させながら光を入射させた場合の光の伝搬の様子を理論的に算出しました。その結果を図4に示します。同図 (a), (b), (c) はそれぞれ、床にこぶがある場合、こぶをカーペットで覆った場合、床が平らな鏡面の場合の計算結果を表しています。いずれも上から、入射角が0度、30度、45度、60度の場合の計算結果です。同図 (a) のこぶに光を入射した場合には、こぶによる散乱がみられますが、同図 (b) のようにこぶをカーペットで覆った場合にはいずれの入射角度の場合にも散乱が抑制されて、同図 (c) の鏡面の場合とほぼ同じ反射・散乱波の分布が得られていることがわかります。これは、いずれの角度からみてもこのカーペットクロークによりこぶが完全に隠されていることを示しています。

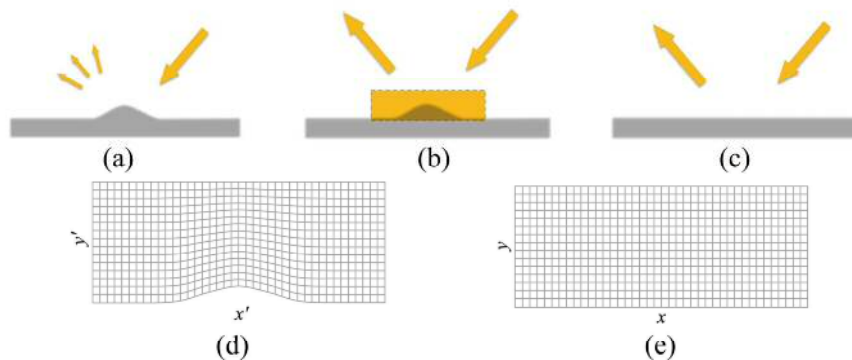


図3 カーペットクローク
(a) 床にこぶがある場合 (b) こぶをカーペットで覆った場合 (c) 床が平らな鏡面の場合
(d) こぶの上部の空間の座標系 (e) 鏡面上の空間の座標系

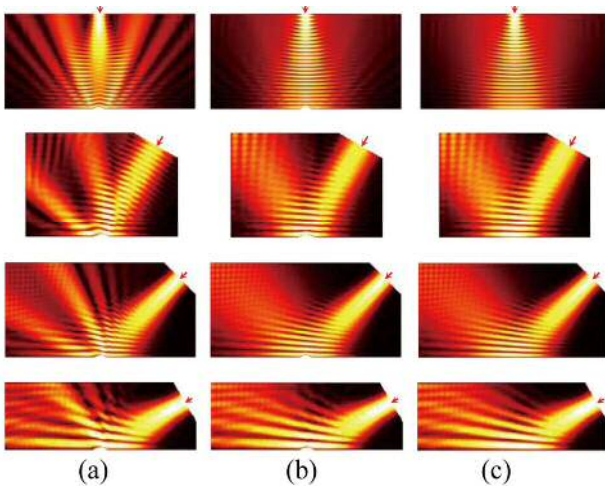


図4 光の伝搬の様子 (いずれも上から入射角がそれぞれ0度、30度、45度、60度の場合)
(a) 床にこぶがある場合 (b) こぶをカーペットで覆った場合 (c) 床が平らな鏡面の場合

実際にカーペットクロックでこぶを本当に隠すためには、広帯域性や低損失性も重要です。可視域のあらゆる波長に対してもカーペットクロックが動作しなければ、床に色が付いているように見えてしまうでしょう。また、損失があればカーペットで覆った部分は暗く見えてしまいます。これらを同時に解決する媒質の設計は非常に困難でしたが、我々は、これらを広帯域性と低損失性を兼ね備えた透明マンツの構成理論を提案しました。この理論はさらに非対角項を含む異方性媒質パラメータを完全に制御できる理論であるため、原理的に任意の形状の座標変換を実現できるという利点もあり、期待されています。

このカーペットクロックを実際に試作しました。図5は、開発した二次元カーペットクロックタイプの透明マンツの写真です。この透明マンツは、直流から波長が数センチ程度のマイクロ波帯の電磁波に対して動作するように設計されています。この動作を確認するため、こぶの上部からマイクロ波を照射した場合の散乱の様子を測定しました。その結果を図6に示します。比較のため、同図下側には理論値も示しています。図6(a)は床にこぶがある場合で、上部から入射したマイクロ波がこぶの左右に強く散乱されている様子が観測されています。同図(b)はこぶをカーペットで覆った場合で、カーペットにより左右の散乱波がなくなっていることがわかります。これは同図(c)の床が平らな鏡面へマイクロ波を入射した場合と比べてほぼ同じ分布となっていること

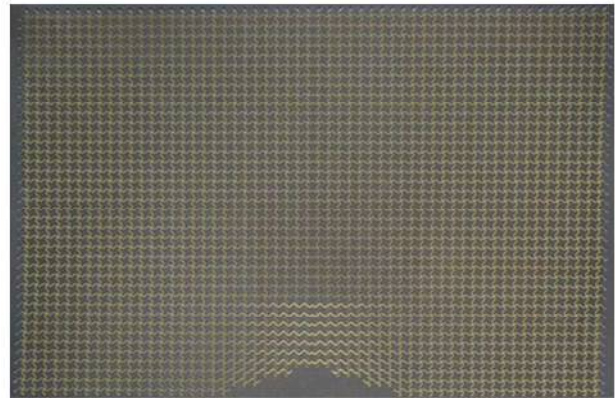


図5 試作した透明マンツ

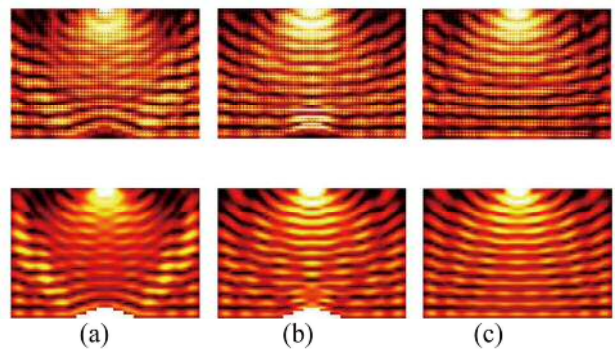


図6 電界分布 (上: 測定値, 下: 理論値, 4.55 GHz)
(a) 床にこぶがある場合 (b) こぶをカーペットで覆った場合 (c) 床が平らな鏡面の場合

から、こぶが見えなくなっていることが確認されました。

今後の展望

今回の透明マンツの動作波長はマイクロ波帯でしたが、構造を光の波長である数100 nm オーダー以下にスケールダウンして作製することで原理的に動作周波数を光波領域までそのまま引き上げることが可能です。現在、可視光領域での試作・評価に取り組んでいます。

変換電磁気学に基づけば、透明マンツのようにあるものを見えなくするだけでなく、逆に実際には存在しないものを、あたかもあるかの如く見せかけることも可能です。実際の物理形状にとらわれることなく、形状の違う別の物体と全く同じ散乱波を持つ媒質を座標変換により作ればよいわけです。その場合、どこから見てもその物体と全く区別がつかなくなります。この媒質はイリュージョン媒質と呼ばれています。現在本研究室でもイリュージョン媒質の試作・動作検証も行っています。

このような変換電磁気学に基づく透明マント媒質やイリュージョン媒質の応用分野は、移動体の死角の排除による安全確保や、建築構造物の隠蔽による

景観保護、工業製品の新たなデザインなどと幅広く、今後ますます発展するものと期待されています。

