

光をあやつる透明化技術

光学迷彩, メタマテリアル——透明になるために必要なこととは？

かぶるだけで透明になり、まわりのだれにも気づかれずに済む“かくれみの”。物語の中のことと考えられていた「透明になる技術」が、少しずつ実現しつつあるという。カメレオンのように背景にとけこむ「光学迷彩」や、光の進む向きを制御する物質「メタマテリアル」など、光と物質をあやつる透明化研究を紹介しよう。

協力：舘 暲 東京大学名誉教授

石原照也 東北大学大学院理学研究科教授

「透明なもの」といわれたとき、何を思い浮かべるだろうか。私たちの身のまわりには、水やガラスなど、その奥にあるものをすかして見せる物質がたくさんある。

もしガラスや水のように透明になることができれば、だれにも気づかれることなく、自由に行動できるようになる。そして近年、光をあやつり、ものを透明に見せるさまざまな研究が進められているという。

しかし、不透明なものをそのまま透明にすることは不可能なはずである。なぜなら、物質が透明になるかどうかは、物質の種類やその状態と、当てる光の波長によって決まってしまうからだ。たとえば、液体の水を、何もまぜないで白く不透明にすることはできないし、鉄のかたまりを透明にすることもできない。

それでは、どうすれば“透明”を実現できるのだろうか。最新の光の研究を通じて、光と物質のしくみについてみていこう。

カメレオンのように風景にとけこむ

もし完全に透明な生物が存在するとしたら、その生物はほかの生物に見つかりにくく、生き残りに有利になりそうだ。しかし多くの生物は、透明な体をもっていない。

そこで、カメレオンやある種の昆虫は、周囲の土や葉、枝などと同じ色、形になることでとけこみ、そこには動物がないかのように見せている。いわば、「透明になる」のではなく、「透明になったように見せている」のだ。

これらの動物は、限られた環境に生息している。そのため、生息環境に似た色にさえなれば、そこにいないかのように見せることができる。それでは、人があらゆる背景にとけこみ、透明になることはできるだろうか。

右ページの写真を見てほしい。これは、コンピューターによる合成画像などではなく、実際に撮影された写真だ。男性が着ているコートの部分だけ、奥の風景がすけられているように見える。まるで昔話に出てくるかくれみののようだ。

これは、東京大学大学院情報理工学系研究科の舘暲教授（当時。現在、東京大学名誉教授）が開発した、「光学迷彩」とよばれる技術である。「迷彩」とは、ものに色を塗って、まわりの風景にまぎれこみやすくすることをいう。光学迷彩は、光をあやつる特殊なコートで風景にとけこむことから、このようによばれている。

舘教授によれば、光学迷彩はどのような風景の中でも適用できるという。たとえば、車や人が行きかう屋外の



館教授が開発した「光学迷彩」技術によって、人が背景に同化するようす。館研究室の吉田匠氏（当時、博士課程1年）に実演していただいた。

風景にとけこむことも可能だ。それは、照明や太陽光など、日常のあらゆる光の中から、必要な光だけを特殊なコートで「選別」するからだという。いったいどのようにして、光学迷彩は「透明」を実現しているのだろうか。

照明光は身のまわりで乱反射する

光学迷彩が相手にしている、私たちをとりまく光の環境をみていこう。そもそも、室内で照明をつけたとき、照明の光と物質の間で何がおきているのだろうか。

まず、照明から出た光は、直進して壁や床にぶつかる。一部の光は壁や床に吸収され、残りの光は「反射」される。そして、壁や床、私たちの身のまわりのものは、ほとんどが微細な凹凸をもっている。照明の光は、この微細な凹凸などによってさまざまな方向に反射する（乱反射。42ページなどを参照）。照明の光は、部屋の中で反射をくりかえしながら、徐々に弱まっていく。

こうして、一つの照明からの光が、部屋の中で四方八方に反射され、部屋全体を照らしているのだ。これは、

屋外の太陽光のもとでも同じである。

特殊なコートで光を選び取る

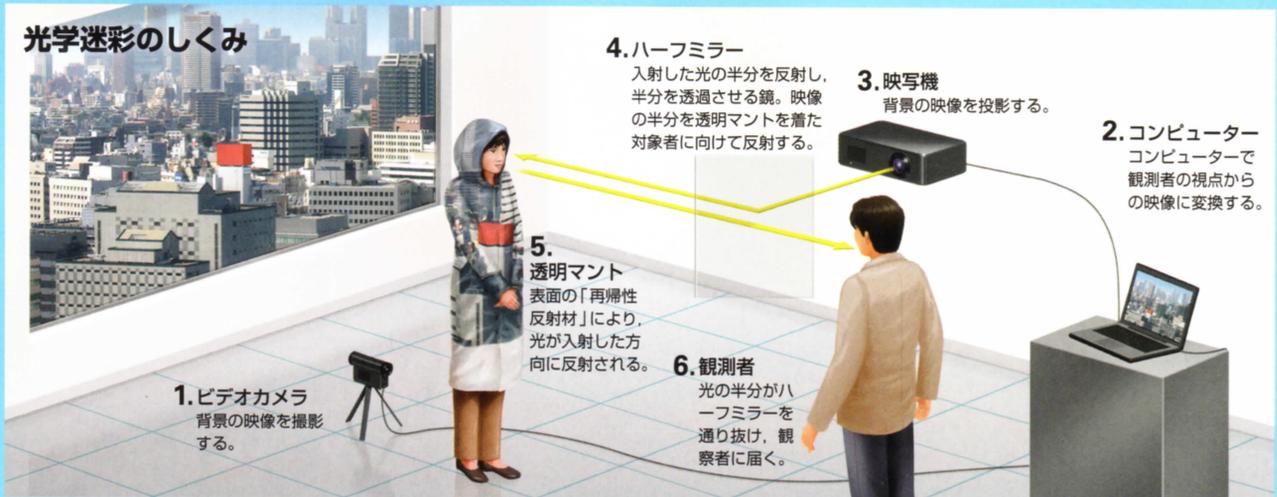
光学迷彩技術は、明るい部屋の中で、コートを着た人を透明に見せている。このとき、二つのことを同時に実現しているという。

一つは、すけて見えるべき背景の映像を、特殊な加工をほどこしたコートに投影し、観察者の方向に正確に反射させることである。

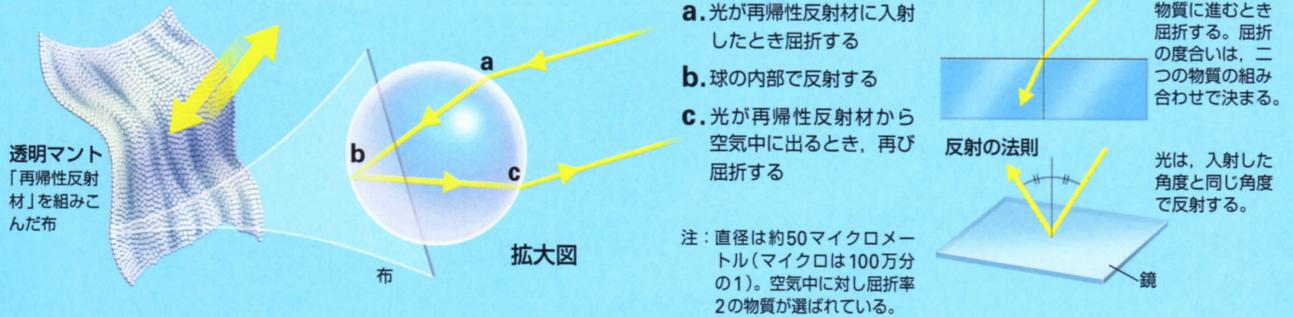
なぜ、このようなことが必要なのだろうか。それは、たんに普通の物質に映像を投影するだけでは、光は表面の細かい凹凸によってばらばらな方向に乱反射し、像が暗くなってしまうためだ。明るいところでも背景がすけてるように見せるには、投影された映像を乱反射させずに、観測者に向けて正確に反射する必要があるのだ（162ページで図解する）。

そして、光学迷彩のもう一つの仕事は、投影した映像以外の、部屋の中の光を、観察者の方向に反射させない

光学迷彩のしくみ



光が来た方向に反射する「再帰性反射」のしくみ



上は、光学迷彩によって人を背景にとけこませるしくみ。下は、コートの表面で、「再帰性反射材」によって光が来た方向に光をはねかえすようす。観測者に、コートを着た人が背景にとけこんでいるように見せるには、観測者の方向から背景を投影する必要がある。そこで館教授らは、光を半分反射し、半分透過させるハーフミラーを用いて、ことなる場所から背景を投影している。

ことである。

なぜ、このようなことが必要なのだろうか。明るい環境では、投影した映像以外の光もコートにあたる。この反射光を観測者が見ると、映像が見えにくくなってしまいうためだ。明るい室内や屋外で映像を投影するには、この不必要な光を取り除く必要がある。

あらゆる反射を制御する「再帰性反射」

どうすれば、投影された映像の光だけを観測者に反射し、しかもそのほかの室内の光を遮断することができるのだろうか。

館教授は「再帰性反射材」とよばれる素材でコートを作製した。再帰性反射材は、光を乱反射させずに、それぞれの光が入射した方向だけにはね返すことができる素材である。

再帰性反射剤は、すでに自転車用品や道路の看板などにも使用されている。たとえば再帰性反射材が車のライ

トに照らされると、ライトの光が必ず運転手にはね返される。前方の自転車の存在や看板の内容をはっきり伝えることができるのだ。

この再帰性反射材の正体は、コートにびっしりとききつめられた、直径50マイクロメートル(マイクロは100万分の1)ほどの球である。「反射の法則」と「屈折の法則」を利用して、あらゆる方向からの光を、元の方向にはね返すという。「光の屈折」とは、光が空気中から水中に入るときなど、ことなる物質に入るとき、光が進む向きが変わる現象をいう。その変化の度合を「屈折率」といい、曲がり方は物質の組み合わせによってことなる。

この再帰性反射材で仕立てたコートに、観測者の位置から映像を投影すると、投影されたすべての光が観測者の位置に反射される。また逆に、観測者のいる位置以外の光は、観測者のいる位置に乱反射されることもない。このようにして、「光学迷彩」は実現したのだ。

光学迷彩技術は、さまざまな用途での実用化が期待さ

れている。「たとえば、自動車の車内に再帰性反射材をはりつけて、車体にかくされた車外のような様子を見せるなどの利用法が期待できます」と館教授は語る（右の写真）。

ほかにも、光学迷彩技術は、レントゲン写真や建造物の配線など、あらゆるものの内部構造を実物に映し出す技術として有望だという。

光の屈折はもう一つあった

光学迷彩は、光の反射や屈折の法則を利用して透明を実現した。ほかに、光の法則を利用して透明を実現する方法はあるのだろうか。

実は2000年ごろから、従来の屈折とはことなる方向に光を曲げる「メタマテリアル」の研究がさかんだ。すでに、無数の回路を並べた構造物で光をう回させたり、従来の「正の屈折」とは逆に光が曲がる「負の屈折」をおこすことに成功しているという。

もし自分の背後から進んできた光をねじ曲げて、前方に送ることができたら、そのとき周囲の人々からは背後からの光しか見えなくなる。目に見える光（可視光線）を自由にあやつれたら、“透明”になれるのだ。「光が屈折する方向を自由にあやつることができれば、今までは不可能だったさまざまなことが実現します」と、負の屈折にく



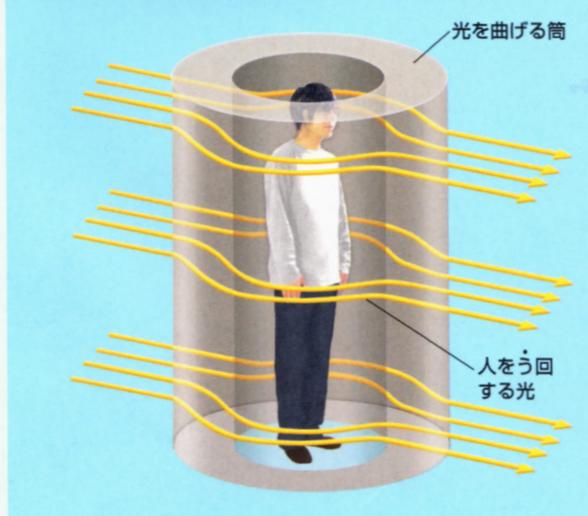
光学迷彩技術の応用例。車外に取りつけたカメラの映像を元に、運転手の視点から見た車の周辺の様子を実時間で映しだしている。
提供：東京大学 館研究室

わしい東北大学大学院理学研究科の石原照也教授は語る。

負の屈折をおこした光は、どんな風に見えるのだろうか。たとえばコップの中に硬貨を入れ、普通の水を注ぐと、光は正の屈折をおこし、実際よりも浅い位置に硬貨が見えるようになる。一方、もし負の屈折をおこす液体をコップに注いだとすると、硬貨は水面上に浮き上がって見えるという。

「マテリアル」は「物質」を、「メタ」は「超えること」を意味する。いわばメタマテリアルは、自然界の物質にはない能力をもっている、「物質を超えた物質」なのだ。そ

もし、光を自由に曲げることができたら？



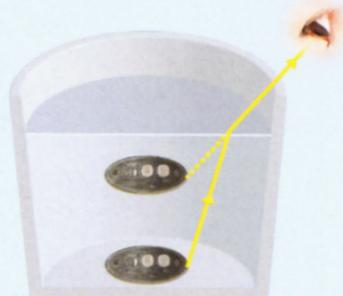
左は、光を曲げる筒の想像図。もし、目に見える光（可視光線）を曲げる筒ができたら、内部に立っている人は周囲から見えなくなる。マイクロ波をう回するメタマテリアルが実現している（164ページ左の写真）。

右は、従来の屈折（正の屈折）と、負の屈折を比較した図。コップの底の硬貨は、まったくちがう場所に像を結ぶ。

光がもっていた“もう一つの屈折”とは？

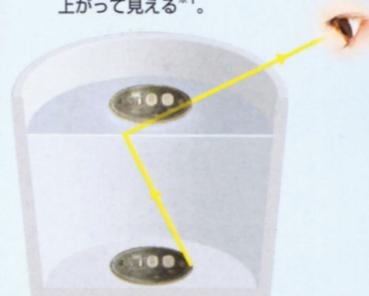
1. 正の屈折

身のまわりでおきている屈折。たとえば硬貨を水に沈めると、硬貨は実際よりも浅い位置に見える*1。



2. 負の屈折

もし負の屈折をおこす液体に硬貨を沈めたら、硬貨は水面上に浮き上がって見える*1。



*1 コップの底など、硬貨以外の部分の見え方の変化は省略してえがいている。また、正の屈折をおこすコップの液体は水、負の屈折をおこすコップの液体は屈折率の絶対値の大きな物質を想定している。



れでは、この奇妙な構造物はどのようにして生まれたのだろうか。負の屈折が実現するまでをみていこう。

40年前の予言が実現した

負の屈折は、1967年、ロシア(旧ソ連)の物理学者ビクトル・ベセラゴによって予言されていた。ベセラゴは、光が物質の境目で曲がる時、2つの向き(正と負)がありうることに気づいたのだ。

こうして、負の屈折をおこす物質さがしがはじまった。しかし、自然界では正の屈折をおこす物質しかみつからず、ベセラゴの予言は忘れられていった。

ところが1999年、イギリスの物理学者ジョン・ペンドリーは、一種の電気回路を利用すれば、負の屈折を実現できると発表した。そして2001年、アメリカの物理学者

デビッド・スミスらは、「負の屈折」をおこす構造物を実現した。ただし、このときは、目に見える光とくらべて数万倍も長い波長をもつ「マイクロ波」で負の屈折を実現していた。

その後、より短い波長の電磁波で負の屈折をおこすメタ材料が次々に誕生した。2008年8月には、アメリカの物理学者である張翔らによって、目に見える光(可視光線)で負の屈折をおこすメタ材料が誕生した。この物質は、わずか80ナノメートル(ナノは10億分の1)ほどの厚さの編目構造を重ねてできている。

このようにメタ材料が急速に進歩してきた背景には、ベセラゴの予言から40年の間に、コンピューターと共に発展したナノテクノロジーがあった。

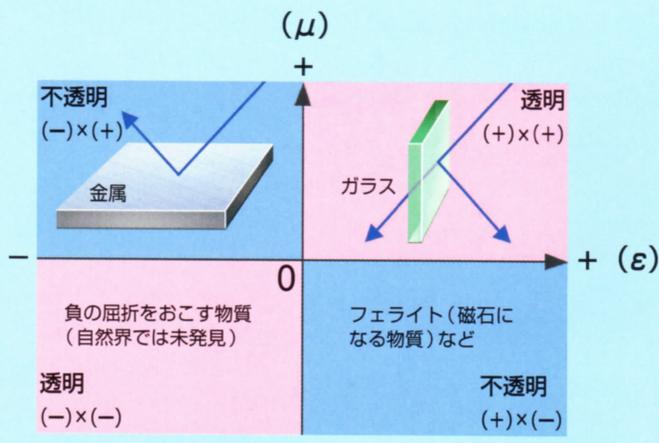
物質が透明になる条件とは?※2

$$n = \pm \sqrt{\mu \times \epsilon}$$

(屈折率) (透磁率) (誘電率)

√の中(μ×ε)が正の数するとき、透明になる

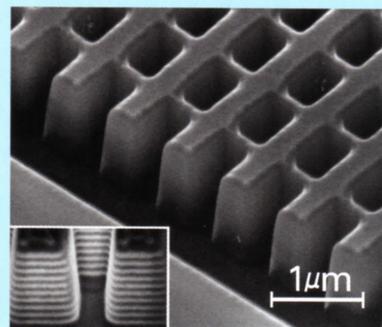
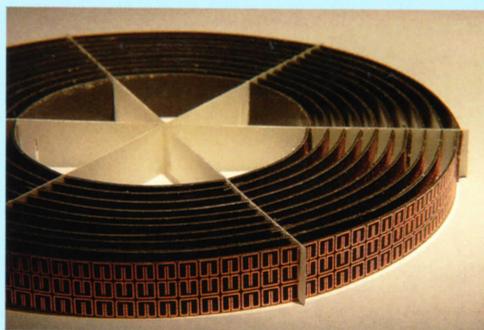
| | | | |
|-----------------------|------------|-----|-----------------|
| ε, μが正の数 | μ×εは正の数になる | 透明 | 正の屈折 (普通の屈折) |
| ε, μのうち、一方が正の数、一方が負の数 | μ×εは負の数になる | 不透明 | 屈折はおきない |
| ε, μが負の数 | μ×εは正の数になる | 透明 | 負の屈折 |



これまでに開発されたメタ材料

開発されたメタ材料の一例。左は、回路を並べてつくられた世界初のメタ材料。「マイクロ波」とよばれる波長の長い光をう回させた。

右は、2008年8月に発表された、80ナノメートルほどの微細構造をもつメタ材料。より波長が短い可視光線で負の屈折を実現した。



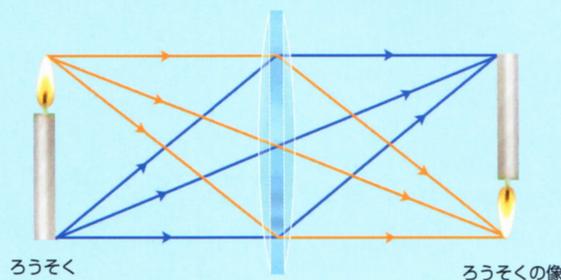
上は、物質が透明になる条件を表であらわした。屈折率は、物質の「透磁率(μ)」、 「誘電率(ε)」という値の積の平方根であらわされる。μとεの積が正の値の物質は、光が透過する。そのため、μ、εが共に正の数の場合のほかに、共に負の数の場合も光は透過できる。

下は、これまでに開発されたメタ材料。特定の波長の電磁波に対して「負の屈折」をおこし、異常な伝わり方をすることが確認されている。

※2 ここでいう「誘電率」と「透磁率」は、厳密には「比誘電率」と「比透磁率」という。「比誘電率」と「比透磁率」はそれぞれ、物体の誘電率と真空の誘電率との比、物体の透磁率と真空の透磁率との比をとったものだ(無次元の値)。

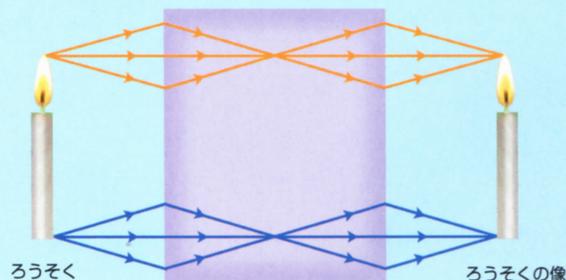
メタマテリアルでレンズをつくる

1. 正の屈折を利用した凸レンズ(普通のレンズ)



普通の凸レンズでろうそくの像ができるようす。実物とはさかさまの像ができる。ヒトの眼のレンズも同じしくみである。そのため、脳で像の向きを直している。

2. 負の屈折を利用したレンズ(スーパーレンズ)



負の屈折をおこす物体が、ろうそくの像をつくるようす。普通の凸レンズとことなり、像は実物と同じ向きにできる。図では、ろうそくからの一部の光の進路を例としてえがいた。

正の屈折を利用した普通の凸レンズと、負の屈折を利用したレンズ(スーパーレンズ)を比較した図。普通の凸レンズでは、像は実物とさかさまにあらわれるが、スーパーレンズの場合は、実物と同じ向きに像があらわれる。

透明になる物質の条件とは?

ベセラゴは、どのようにして負の屈折を予言したのだろうか。

光の伝わり方(148~149ページ)を解明したジェームズ・クラーク・マクスウェルによれば、光の屈折率は、物質がそれぞれもっている「誘電率」^{ゆうでんりつ}、「透磁率」^{とうじりつ}*2という値をかけたあと、平方根をとった値であらわされる。

この式を使えば、すべての物質が透明か不透明か区別できる。たとえば金属は、誘電率が負、透磁率が正の数である。その積は負の数になるので、不透明になる。また、ガラスや水などは、透磁率、誘電率が共に正の値をもち、その積も正の値になる。このような物質は「正の屈折」をおこし、透明になる。

そしてベセラゴは、透磁率、誘電率がともに負の値のときも、積が正の値になるため、透明になることに気がついた。さらに、光の進み方を検討して、「正の屈折」とは逆に曲がる「負の屈折」がおきると予言したのだ。

“透明”かどうかは電子でさまる

なぜ、光の屈折が透磁率、誘電率などの電磁気に関する数値で決まるのだろうか。これは、光の正体に理由がある。

光は、「電磁波」の一種である。電磁波とは、電場と磁場がたがいを振動させながら空間を伝わる波のことをいう。物質中の電子がこの振動を邪魔するときは、物質は不透明になる。逆に、この振動を邪魔しないとき、電磁

波は物質中を伝わるため、透明に見えるのだ。

たとえば金属の場合、その内部では、一部の電子が原子をはなれて、金属のかたまりの中を動きまわっている(自由電子)。金属に光が当たると、金属の表面の自由電子は、光を内部に入れまいとする。すると光は反射され、不透明になる。

次に、ガラスや水などを考えてみよう。これらの物質に可視光線の光が当たったとき、電子は原子に束縛されたままだ。すると、光は物質の中を進むことができ、透明になるのだ。このように、透明になるか不透明になるかは物質中の電子の結合のしかたによって決まる。

一方、金属でできたメタマテリアルは、なぜ負の屈折をおこし、透明になるのだろうか。金属は、光が当たると電流が生じる。メタマテリアルの微細な回路は、この電流で磁場を生じさせることで、特定の波長の光では透磁率が負になるように設計されているという。もともと金属は誘電率が負の物質である。こうして、「負の屈折」の条件を実現しているのだ。

「負の屈折」という現象は、さまざまな応用が提案されている。たとえば従来の顕微鏡^{けんびきょう}では、光の波長よりも細かい物質を見ることができない。しかし、メタマテリアルを用いた「スーパーレンズ」は、この限界を超える可能性があるという。今まで、光では見ることができなかった領域が見えるようになるかもしれない。

これらの「透明」研究の先にある、新技術の登場を期待したい。