

Unexpected tricks of the light

透明マントの使い道

Nature Vol.446 (364-365) / 22 March 2007



昨年、身につけた人の姿が見えなくなる「透明マント」を作れるかもしれないというニュースが報じられた。確かに透明マントは好奇心をそそられる話だが、その材料となる「メタ物質」が実際に応用されるのは、もっと地味な分野になりそうだ。Katharine Sanderson記者が報告する

物体を見えなくしてしまうことができる世界がある。この世界では、光を異常な方向に曲げたり、「スーパーレンズ」を使って信じられないほど小さな物体の鮮明な映像を得たりすることができる。この不思議な世界が現実中存在するとは考えにくいかもしれない。事実、この世界はまだ現実のものにはなっておらず、おおむね理論物理学者の頭の中にある。しかし、こうした奇妙な性質の一部は「メタ物質」という形で実現しつつあり、「透明マント」を夢見る少年の胸を躍らせるだけでなく、ビジネス界の興味も引き始めている。

ロンドン大学インペリアルカレッジの研究者である Michael Wiltshire は、「実際には、メタ物質の応用はずっと地味なものになりそうだ」と話す。彼は、メタ物質の最初の用途は、通信用アンテナか生物学研究のための画像撮影技術になるだろうと予測する。それは、昨年、「ハ

リー・ポッターと魔法のマント」という派手な見出しで報じられたものとはかけ離れた用途であるが、新しい光学的トリックの世界への第一歩なのだ。

メタ物質は、それが操作する電磁波の波長と同程度か、通常はそれよりも小さい機能単位をもつように設計されている。機能単位は金属製の小さなワイヤとコイルであることが多く、これらが電磁波の電気的成分と磁気的成分を一見、異常な方法で操作する。メタ物質の性質を決めるのは、メタ物質の原子構造ではなく、この小さな機能単位なのである。

メタ物質の研究が盛んになったきっかけは、2000年にインペリアルカレッジの John Pendry が、これを使って入射する光の波長よりも小さい物体の像を得る「スーパーレンズ」を作れるかもしれないと提案したことだった¹。こうした物体を鮮明に撮影できるレンズを作る

ためには、入射する光を異常な方向に曲げる、負の屈折率をもつ物質が必要となる。早くも2001年には、可視光域ではないが、負の屈折率をもつ物質が作られた。デューク大学（ノースカロライナ州ダラム）の David Smith が、片面に銅の細いテープを、反対側の面にC字型リング共振器をプリントしたガラスファイバー回路基板を格子状に組み合わせて2次元メタ物質を作ったのである²。

しかし、メタ物質の研究が一般の人々の注目も集めるようになったのは、2006年5月に Pendry が理論的にはメタ物質を使って透明マントを作れるかもしれないと提案してからのことだった。Smithらの研究チームはこのときもわずか5か月後に、メタ物質を使って物体を見えなくすることができることを実験で示してみせた。Smithの「透明マント」は、銅線をプリントしたガラスファイバー板の輪を

同心円状に配置したものであった（次ページ図参照）。物体をこの装置の中に置いてマイクロ波を当てると、水の流れの中に差し込んだ棒の周囲を流れが回るように、マイクロ波はここを避けて伝わっていく。う回したマイクロ波は装置の向こう側で再び出会い、物体がそこになかったかのように伝わっていくのである³。

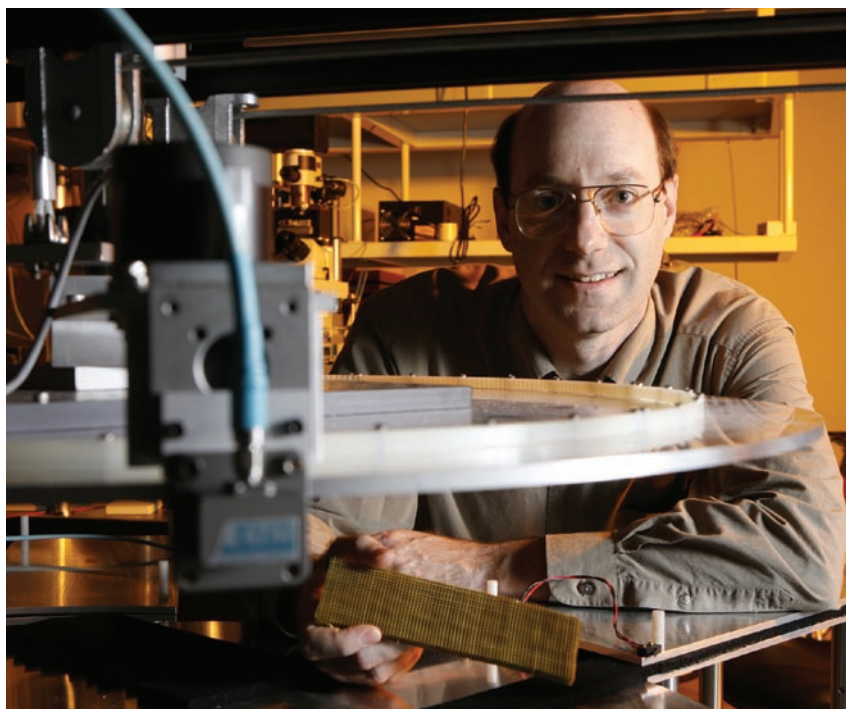
この透明マントの試作品は、2次元でのみ、かつ、狭い幅の波長でしか働かないものの、マントの原理が正しいことを証明した。これにより、軍関連機関が大喜びしそうな「究極のカムフラージュ」が実現可能であることが確実にされた。

Pendryによると、1950年代に最初のメタ物質を開発したのは米軍であり、それ以来、米軍はこの技術に興味をもち続けてきた。研究予算の大半を軍から得ているSmithは、「確か最も関心をもっているのは軍だ」と話す。米国の国防総省高等研究計画局（DARPA）は、2001年にメタ物質研究計画を立ち上げた。DARPAは6年間で合計4000万ドル（約48億円）の研究予算を投じてきた。これは、年間予算が数十億ドルのDARPAにとっては小さな額だが、新興の研究分野にとっては十分な額である。

DARPAのスポークスマンは、「メタ物質の開発は今のところ、エキサイティングで有望だ。しかし、それを現実に応用するにはまだかなりの研究開発を必要とする」と話す。Smithでさえ、完全な透明マントが現実のものになるとは考えていない。「ジェット戦闘機を見えなくすることはできないだろう。どれほどの大きさの物体なら隠せるようになるのかも、まだわからない。私たちは現在、完全なマントを実現するためのパラメーターを調べているが、それでさえ非常にむずかしい」とSmithは話す。

源流はロシアに

Pendryは、軍の契約企業のためにレーダー吸収物質の研究に取り組んでいるときに、ロシア科学アカデミー（モスクワ）の物理学者Victor Veselagoが行った研究に出くわした。メタ物質は、物質の誘



David Smithは、メタ物質が負の屈折率をもちうることを初めて示した。

電率と透磁率という2つの基本的性質を利用する。誘電率と透磁率は、電磁波の電場と磁場が物質とどのような相互作用をするかを定める量である。大半の物質の誘電率と透磁率は正の値になっている。Veselagoは1960年代に、それまでの研究を拡張して、誘電率と透磁率の両方が負であるときに何が起るかを研究した。そしてこのとき、屈折率（光がある媒質から別の媒質に入るときに曲がり方を定める量）が負になって、新しい光学的性質が現れるという結論に達した。この研究を知ったPendryは、メタ物質を使えばVeselagoのアイデアを実現できるかもしれないと考えたのである。

DARPAは当初、光学にとどまらず、もっと強力なモーターを作るための磁石、レーダー、材料の熱処理能力を制御できる構造をもった表面などへの応用も考えていた。けれども現在では、レーダー用の極超短波（UHF）アンテナへの応用がもっとも有望そうだと考えている。Wiltshireも同じ意見である。

DARPAはレーダー研究について多くを明かそうとしないものの、別の研究者たちは無線周波数のアンテナにメタ物質

を応用して製品化しようとしている。従来のアンテナは無線電波の波長の半分の高さを必要とする。このため、低い周波数ではアンテナの高さは何メートルにもなってしまう。しかし、携帯電話やノートパソコンなどの次世代の携帯機器のアンテナは、もっとコンパクトでなければならぬ。

まずはアンテナに

波長を短くし、アンテナを小さくする1つの方法は、周波数を上げることだ。30ギガヘルツでは波長は1センチになる。しかし、周波数の高い電波は障害物によって遮られやすく、都市部の通信網には使えない。通常物質では波長は周波数に反比例する。しかし、負の屈折率をもつ材料で作ったアンテナでは奇妙なことが起る。周波数が下がると、見かけの波長も短くなるのだ。カナダのトロント大学の電気工学者であるGeorge Eleftheriadesは、「これは従来の物質で起ることとまったく逆だ」と説明する。

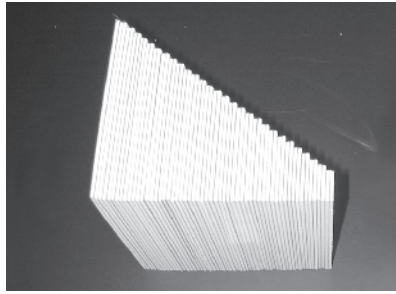
Eleftheriadesによると、この性質を利用すればアンテナの高さを波長のわずか30分の1にすることができ、ミ

リメートルサイズのコンパクトな装置を実現できる（右図を参照）。「この装置では、周波数が下がると波長も短くなる。大半の無線通信システムが利用している1～5ギガヘルツの低い周波数帯でも短いアンテナを作ることができる」とEleftheriadesは話す。

Eleftheriadesは、アンテナ用のメタ物質の開発でトロントのノーテルネットワークス社と契約を結んだ。同社とカナダ政府は、その開発プロジェクトに40万ドル（約4800万円）もの資金を共同出資している。Eleftheriadesはアンテナの設計の特許も持っている。

応用はアンテナだけではない。「可視光領域は現実的にもっとも重要な応用分野かもしれない」とPendryは話す。可視光を新しい方法で操作できるようになれば、光ファイバーケーブルなどの光通信装置の性能や生物学での画像撮影技術は大きく向上するだろう。しかし、可視光の波長に合わせてメタ物質の機能単位を縮小することは、これまで以上にむずかしい。複数の波長を同時に制御できる機能も必要になる。それには非常に微細で複雑な技術が必要となるだろう。

物理学者たちは、負の屈折率をもつ材料を使った光デバイスにより「回折限界」を突破し、スーパーレンズを作りたいと考えている。光の波長の約半分よりも小さな物体を見ようとする、通常のレンズでは回折により像がゆがんでしまう。これに対して、負の屈折率をもつ



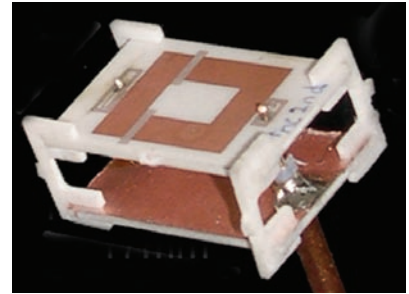
負の屈折率をもつ物質（左）は、コンパクトなアンテナ（右）などの装置で使われている。

レンズでは、波長以下の物体からの可視光を結像させることができ、ゆがみのない像が得られるはずだ。「細胞や細胞内過程の詳細で鮮明な画像を得られるようになり、生物学での画像撮影技術に革命が起こるはずだ」とPendryは主張する。

2005年、米国とニュージーランドの2つの研究チームが、銀の薄膜を用いて、紫外線の波長域で働く単純なスーパーレンズを作れることを示した^{4,5}。銀はもともこの波長域で負の誘電率をもっているため（透磁率は負ではない）、物体とレンズの間の距離を波長よりもずっと短くすることで、スーパーレンズとして機能することができる。実験では、回折限界についてはわずかな改善しかみられなかったが、このようなスーパーレンズはすでに近接場赤外顕微鏡の改良に使われている⁶。Smithは、メタ物質中の損失と欠陥により達成できる分解能には限界があることを認めているが、「スーパーレンズという概念自体は確かなものだ」という。

「メタ物質の技術が有用であるかどうかと、ビジネスとして成り立つかどうかは別問題だ。それはライバル技術との競争しだいだ」とSmithは話す。彼は、メタ物質のアイディアはすでに次世代のエンジニアに影響を及ぼしている指摘する。「こうした概念は、エンジニアたちが利用する巧妙な技術中に入り込み、特に意識されることなく用いられていくのかもしれない。それは非常に静かな革命になるだろう」という。

例えば航空宇宙企業のボーイング社（ワシントン州シアトル）も、主としてDARPAから研究資金を得て、負の屈折率をもつメタ物質をレンズとして使う方



法を研究した。人工衛星では、レンズを使ってマイクロ波の信号をアンテナに集中させ、地上から見つけやすくなるようにしているからである。ここで、負の屈折率をもつレンズを通信衛星に利用すれば、レンズを軽くしながら、性能を向上させることができるだろう。Wiltshireは、「これは特殊な分野だが、メタ物質の応用例としてわかりやすい。私たちがメタ物質を利用して実現しようとしているのは、人目を引くようなことではない。レンズが軽くなるといった地味なことなのだ」と説明する。

インテレクトチュアルベンチャー社（ワシントン州ベルビュー）の最高経営責任者であり、マイクロソフト社の最初の最高技術責任者だったNathan Myhrvoldは、メタ物質に関する特許をだれよりも多く持っているという。彼は「メタ物質の特許は数十件も持っている。メタ物質を応用する際に問題となるのは、いつそれを使うかではなく、どこにそれを使うかだ。ビジネスの面からいえば、メタ物質は今のところ、問題を探している答えのようなものだ」と話す。Myhrvoldはこの分野に参入している多くの人たちと同じように、この技術が大きく飛躍するときがくると確信している。

Katharine SandersonはNatureのロンドン駐在記者。

1. Pendry, J. B. *Phys. Rev. Lett.* **85**, 3966–3969 (2000).
2. Shelby, R. A., Smith, D. R. & Schultz, S. *Science* **292**, 77–79 (2001).
3. Schurig, D. *et al. Science* **314**, 977–980 (2006).
4. Fang, N., Lee, H., Sun, C. & Zhang, X. *Science* **308**, 534–537 (2005).
5. Melville, D. *et al. Opt. Express* **13**, 2127 (2005).
6. Taubner, T., Korobkin, D., Urzhumov, Y., Shvets, G. & Hillenbrand, R. *Science* **313**, 1595 (2006).



Smithが作った「物を見えなくする装置」は今のところ、マイクロ波で見る場合にのみ有効である。