

How to drive light round the wrong bend

光を逆向きに曲げる方法

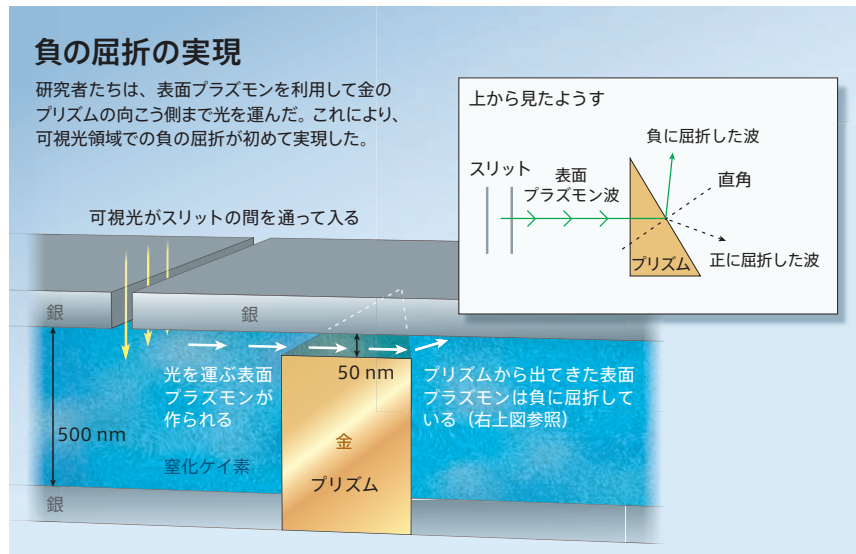
Nature Vol.445(346-347)/25 January 2007
Katharine Sanderson

可視光を操作して逆向きに曲げることはできるのだろうか？ そうだとしたら、光の波長よりも小さな物体の像を得るレンズや、中にあるものを見えなくするシールドなどのさまざまな未来の道具が、手を伸ばせば届きそうなところまで近づいてきたことになる。

数人の科学者は、可視光領域でこうした「負の屈折」を実現することは事実上不可能であると主張してきたが、現在、あるグループがこれを実現させたと主張して、本物の屈折とは何かという論争をよんでいる。

光は、ある媒質から別の媒質へと進入するときに決まった曲がり方をする。これが、屈折とよばれる効果である。負の屈折とは、普通とは逆の方向に光が曲がることをいい、光波の山と谷の進行方向が、光波そのものの進行方向に対して逆向きになるときにのみ起こる。

負の屈折率をもつ材料があれば、光を分散させることなく、完全に収束させることができる。ロンドンインペリアルカレッジのJohn Pendryは、この概念に基づいて、光の波長よりも小さな物体の像が得られる「完全な」レンズを製作できるという予言をした。一部の研究者は、屈折率は正の値しかとれないと主張した。けれども2003年にマイクロ波領域で負の屈折が起こることが示され^{1,2}、後には赤外線領域



でも負の屈折が起こることが示されたことで、論争は終結した。

研究者たちは、光の波長とほぼ同じ大きさの構成成分からなる「メタ材料」を利用して、負の屈折を実現した。最近ではPendryがメタ材料を使って物体の周囲で光を曲げる「不可視シールド」を作ったが³、これはマイクロ波領域でのものだった。

可視光領域で負の屈折を実現することは、とうてい不可能であるように思われた。マイクロ波や赤外線の波長は μm から cm の単位にあるため、これらを負に屈折させるための材料の構成

成分もこの単位の大きさでよい。けれども、可視光の波長に相当する500nm前後の構成成分をもつメタ材料を作るのは、非常にむずかしいからである。

今回、カリフォルニア工科大学（パサデナ）のHarry Atwaterの研究室に所属するJennifer DionneとHenri Lezecは、可視光領域で負の屈折率を示すという材料を公開した。Dionneは、1月11日にNanometa 2007にてその成果を発表し、論文を提出した。Nanometa 2007は、ナノ光学とメタ材料についての会議で、オーストリアのゼーフェルトで開催された。



水の入ったコップにさしたストローは、光の屈折のために切れているように見える（左）。光が負に屈折した場合を予想して作った模型（右）では、驚くべき効果が見られる。水面の下側は見えるが、コップの底は見えない。より正確なモデルについては文献4を参照されたい。

理論家たちは最近、可視光の波長に匹敵するほど小さな構成成分からなる材料を作る代わりに、金属表面で振動している自由電子に光が衝突することで生じる表面プラズモンという電磁波を利用して、光を望み通りの方向に導く方法を提案している。今回、DionneとLezecは、まさにこれを実現したのである。彼らの装置は導波管とよばれるもので、2枚の銀の薄板の間に窒化ケイ素インシュレーターを挟んだ構造になっている。

光は、上の銀板のスリットの間を通過して装置の中に入ってくる。装置の中に入った光波は、銀板の中の振動する電子と結合して表面プラズモン波を作り、これが金属の表面に沿って進んでいく。けれども、窒化ケイ素の中には金で被覆したプリズムが埋め込まれており、プリズムと上の銀板との間には幅わずか50nmのギャップがある（図参照）。表面プラズモン波は、このギャップを横切るときに反射される。Dionneは、負に屈折した波長480～530nmの青緑色の光が装置から出てくるのを検出したと主張している。その屈折率は、-5という低さであった（ちなみに、空気中から水中へと入射する光の屈折率は+1.33である）。

表面プラズモンにプリズムの上の狭いギャップを通らせることで、その運動を制限し、1つのモードの表面プラズ

モン波だけが通過するようにすることができる。光が特定の波長をとるとき、表面プラズモン波の周波数が金属塊の中の振動する電子の周波数に近くなる。このとき、表面プラズモン波が振動する電子と相互作用して、波の山と谷の進行方向が逆向きになり、負の屈折が起こるのである。

Dionneにとっては、これにより「角の向こう側を覗く」ことが実現した。「魔法のように見えるかもしれませんが、これでうまく行くのだ」と彼女はいう。

この分野のほかの研究者は、もっと慎重である。ジョージア州立大学（アトランタ）の理論家Mark Stockmanは、この系では光の1%しか通過していないという、その効率の悪さに懸念を抱いている。これに対してDionneは、直接検出するのに十分な量の光が通過していることを強調し、効率を高めることは可能だと考えていると述べている。

そもそもこれが本物の負の屈折なのかという点に疑問をもっている研究者もいる。同じく可視光の負の屈折を実現しようとしているサルフード大学（英国）の理論家Allan Boardmanとパデュー大学（インディアナ州ウエストラファイエット）のVladimir Shalaevは、この実験は可視光ではなくプラズモンの負の屈折を示したにすぎないと主張している。「これは本物の負の屈折ではない」と、

Boardmanは話す。「まだまだ改良していかなければならない」。

けれども、サウザンプトン大学（英国）のNikolay Zheludevは、「結果は同じなのだから、そんなことは問題にはならない」という。「実験に間違いがないなら、この報告は重要だ」とZheludevはいう。「たしかにこれは負の屈折だ」というのは、カリフォルニア大学ロサンゼルス校のEli Yablonovitchである。「私には、特に問題があるようには思えない」。

Pendryも、これが負の屈折であることを確信しているが、こんなに早く実現するとは思っていなかったとも告白している。「非常に興味深い。彼らの方法は、とてもすばらしいと思う」。

彼らが示したものが本物の負の屈折であるかどうかは別にして、これを役立てるためには、2次元の系を3次元の装置にする必要がある。Atwaterは、直立させた導波管をぎっしり並べることを計画している。「まだ実現はしていないが、少なくともこの研究により、それがもつ可能性が見えてくると考えている」。

1. Parazzoli, C.G., Greigor, R.B., Li, K., Koltenbah, B.E.C. & Tanielian, M. *Phys. Rev. Lett.* **90**, 107401 (2003).
2. Houck, A.A., Brock, J.B. & Chuang, J.L. *Phys. Rev. Lett.* **90**, 137401 (2003).
3. Schurig, D. et al. *Science* **314**, 977-980 (2006).
4. Dolling, G., Wegener, M., Linden, S. & Hormann, C. *Optics Express* **14**, 1842-1849 (2006).