

電磁メタマテリアルの研究動向

石原 照也

Research Trend in Electromagnetic Metamaterials

Teruya ISHIHARA

It is now possible to design permittivity and permeability so that they are very different from those of constituent materials by fabricating structures sufficiently larger than atoms but smaller than wavelength of electromagnetic wave of interest. Especially when permittivity and permeability is both negative, refractive index is negative. Since the first demonstration has been carried out in 2001 at microwave frequency, the field grows exponentially. In 2007, negative index of refraction was reported at 780 nm, which is visible, with a perforated silver/alumina/silver structure. In this article present status of the field as well as prospect will be reported.

Key words: negative refractive index, permittivity, permeability, metal

光学では光を制御するためにさまざまな形で物質を利用してきた。特に可視光領域で透明なガラスには種々の成分が加えられ、光学において中心的な役割を果たしてきた。しかし、今世紀に入って、まったく新しい形の「物質」が現れ、今急速に発展してきている。その「物質」とは原子より十分大きく光波長のスケールより小さい人工構造であり、透磁率と誘電率を自在に制御し、屈折率を負にすることさえも可能となる。これをメタマテリアルとよぶ。通常の物質では位相が必然的に遅れるのに対し、負の屈折率をもつ物質は位相を打ち消す光学的な反物質として振る舞うため、光学素子の設計に革命をもたらすことになると予想される。負の屈折に関連する物理の2004年までの発展に関しては、Ramakrishnaによるレビュー¹⁾が参考になる。最近では、異方的なメタマテリアルを用いると、隠れ蓑や超解像イメージングといった「ありえない技術」も可能となることがわかってきた。現時点で可視光領域で実現できることは限られているが、マイクロ波領域の実験的な検証をよりどころに、可視光領域で実現するための努力がなされつつある。本稿では、物理的な概念と現状について概観し、将来展望について考察する。

1. 負の屈折率

1967年(英訳は1968年)に旧ソ連の理論物理学者 Veselago は、マクスウェル方程式の平面波解について議論し負の屈折率という概念を提案した²⁾。後年メタマテリアルによって実現されることになるこの概念について、最初に解説する。一般にある媒質1から別の媒質2に光が入射するとき、屈折が生じる。界面に平行な波数ベクトルが保存されること:

$$k_1 \sin \theta_1 = k_2 \sin \theta_2$$

それぞれの媒質での分散関係から波数の大きさが定まること:

$$\omega = ck_1 = ck_2/n, \quad n^2 = \epsilon\mu$$

から屈折角が決まる。通常 n は正であるが、実は以下に議論するように、負であると認めなくてはならない場合が存在する。

物質中のマクスウェル方程式は

$$\begin{aligned} \text{rot} \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\mu\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \\ \text{rot} \vec{H} &= \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \epsilon\epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \end{aligned}$$

東北大学大学院理学研究科物理学専攻 (〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3) E-mail: t-ishihara@mail.tains.tohoku.ac.jp

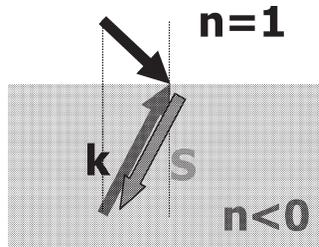


図1 負の屈折現象.

となる。ここで平面波 $\vec{E}, \vec{H} \propto \exp(i\vec{k} \cdot \vec{r} - i\omega t)$ を仮定すると

$$\vec{k} \times \vec{E} = -\omega\mu\mu_0\vec{H}$$

$$\vec{k} \times \vec{H} = -\omega\varepsilon\varepsilon_0\vec{E}$$

これを組み合わせると、分散関係

$$k^2 = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \varepsilon\mu$$

が得られる。伝搬波が許されるためには、 ε と μ の積が正であることが必要となる。通常、光学領域では $\mu=1$ であるので、平面波が存在するのは $\varepsilon>0$ の場合であるが、仮に ε と μ が同時に負であっても平面波解は存在することになる。 $\varepsilon<0, \mu<0$ のとき、マクスウェル方程式は $\vec{E}, \vec{H}, \vec{k}$ が通常と逆に左手の関係をもつので、このような媒質を左手系媒質とよぶ。ポインティングベクトル $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$ であるから、波数ベクトルとポインティングベクトルは反平行になる。図1に示したように、左手系媒質の場合、 $n>0$ とおってしまうとエネルギーの流れが界面で逆向きになってしまうので、 $n<0$ と選ばなくてはならない。 ε と μ が複素数の場合の考え方に関しては、文献3で取り扱われている。左手系という名前は旋光性を連想させるが、これとはまったく別の概念なので、最近では負屈折率媒質とよばれることが多くなっている。媒質が負の屈折率をもつとドップラー効果、チェレンコフ効果、光の放射圧が通常と逆向きになるなど、さまざまな常識はずれの性質をもつことになる。

さらに興味深いのは、イメージング機能である。図2に示したように、 ε_1, μ_1 の媒質から $\varepsilon_2 = -\varepsilon_1 < 0, \mu_2 = -\mu_1 < 0$ の平板状媒質は、ある点から出た光を反射なしに反対側の点に結像する。図から明らかなように、平板から a だけ離れた点は厚さ d の平板の後ろ面から $d-a$ だけ離れたところに焦点を結ぶ。すなわち、焦点距離は $2d$ であって、平板前面より d 以上離れると像を結ぶことはできない。また、この「レンズ」は通常のレンズと異なり、像を正立のまま転送する。

このように誘電率と透磁率が同時に負である物質は興味

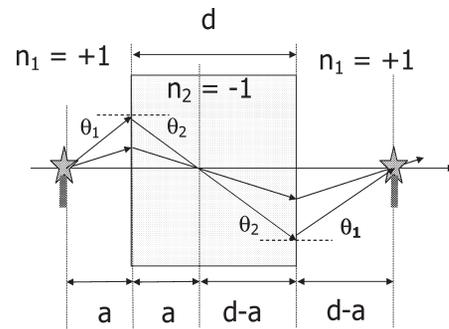


図2 完全レンズの結像作用.

深い性質をもつが、このような条件を満たすものが発見されるのには、その後30年以上も要したのである。

2. マイクロ波領域の人工電磁媒質

2.1 負の誘電率

英国の Pendry らは1996年に、金属細線集合体がマイクロ波領域で負の誘電率をもつという論文を発表した⁴⁾。金属のプラズマ周波数以下であれば、プラズマ応答するのは人工媒質をつくらずとも当たり前であると思われる方もいるかもしれない。しかし、マイクロ波領域の振動数は金属の緩和定数よりも小さく、ハーゲン・ルーベンス領域とよばれる、誘電率が純虚数の世界である。金属を細線に分割し、有効電子密度を下げるとともに、インダクタンスが上がって電子の有効質量が大きくなることを利用して、有効プラズマ周波数を紫外線領域からマイクロ波領域に下げてそれを実現したのである。

2.2 人工電磁媒質の粗視化

次に Pendry らは、マイクロ波領域の磁場に対して応答する人工媒質を議論するため粗視化の処方箋を与えた⁵⁾。有効透磁率 μ は

$$B_{\text{ave}} = \mu\mu_0 H_{\text{ave}}$$

のように定義されるが、もしも平均のとり方が磁束密度と磁場で同じであるなら、透磁率は1になってしまう。しかし、人工構造の(波長より十分に小さい)構造単位に対してマクスウェル方程式の積分形を考えてみると、磁束密度と電束密度は面積分で、磁場と電場は線積分で定義すべきことがわかる。非磁性金属の構造で透磁率が1から大きくずれるのは、単位構造の中の場合が不均一であるからである。このように構造単位に場を割り当てる粗視化の考え方の詳細については、Smith と Pendry によるレビュー⁶⁾を参照されたい。

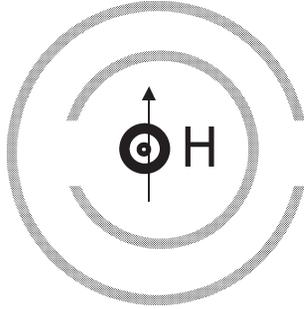


図3 分割リング共振器。

2.3 分割リング共振器

ほとんどの物質は、数 GHz 程度で磁気応答はなくなってしまう。実際ランダウとリフシツの教科書⁷⁾では、原子中の電子の軌道運動による磁性が光学領域で無視できるという一般的な議論を行っている。しかし、金属の構造体では電流と分極電流が磁性を生じる。図3に示したような分割リング共振器 (split ring resonator; SRR) とよばれる構造体では、内部の磁場変化を打ち消そうとする電流によって磁気的な応答を示す。カットはコンデンサーの役割を果たすので、この構造は有限の周波数で共鳴応答を示し、負の透磁率を示す周波数領域が生まれる。逆向きのカットをもつリングを2つ組み合わせるのは、強い電気的な応答が生じるのを抑えるためである。実際は、図のような構造では対称性が悪いため、共鳴は磁気応答と電気応答が混合した複異方性 (bianisotropy) をもったものになっている⁸⁾。この混合を避けるには、対称性を上げることが必要である。

3. マイクロ波領域における負の屈折と結像の実験的検証

3.1 透過スペクトル

2000年にSmithらは、負の透磁率を示す分割リングと負の誘電率を示す金属線を図4のように組み合わせて、負の屈折率を示す最初のメタマテリアルを作製した⁹⁾。負の屈折率をもつことは、分割リングのみでは透過しない周波数帯が、金属線と組み合わせることで透過するようになることから結論された。しかし、透過率がきわめて小さかったことや導波路を用いた測定であったため、否定的な議論も引き起こした。現在では、最適化された構造を用い、反射と透過を自由空間で同時に測定した実験などで、負の屈折率の存在は確実なものとなっている。

3.2 屈折現象の確認

2001年には、メタマテリアルの最初の屈折実験がマイクロ波領域で行われた¹⁰⁾。試料は、金属ストリップと



図4 最初のメタマテリアル⁹⁾。(写真は Materials Today, 9 (2006) 26 による)

SRRをパターンしたプリント基板をワイン箱の仕切り板状に組み合わせて、平面内で等方的 (4回対称) なプリズムを作製した。導波路内でこれにマイクロ波を照射し、負の屈折を示すように設計された構造体と通常物質であるテフロンを比較して、負の屈折を実証した。これに関しては導波路の存在による付加的影響が懸念されたが、後にポインティングのグループによる自由空間における実験が行われ、ここに負の屈折現象が実在することはゆるぎないものになった¹¹⁾。負の屈折現象自体は、メタマテリアルとはみなせないフォトニック結晶においてもみられる場合がある^{12,13)}。また最近、表面プラズモンの分散を利用した可視光領域の負の屈折のデモンストレーションが行われた¹⁴⁾。

負の屈折は日常観察することができない現象なので、多くの議論を生み出した。ホイヘンスの原理によって作図を行うと、外側の光線は一瞬のうちに有限の光路差に追いつかなくてはいけないように見える。Valanjuらは、2つのわずかに異なった周波数の光を干渉させ、干渉面が負の屈折率をもった媒質においてどのようなになるかを調べ、干渉の方向を群速度の方向、したがってエネルギーの流れの方向と考えて負の屈折について批判した¹⁵⁾。しかしその後、干渉縞の方向と群速度の方向は一般に異なりエネルギー流れは確かに負の屈折をすること¹⁶⁾、時間領域の計算から屈折方向が定まるには有限の時間がかかること¹⁷⁾が数値計算によって示され、現在では負の屈折が現実的なものであることが広く認められている。

3.3 伝送線路によるアプローチ

Smithらがマイクロ波における負の屈折の議論を行ってまもなく、これと電波工学の分野で知られ、すでに増幅用に実用化されていた後進波との関係が指摘された。伊藤¹⁸⁾とEleftheriades¹⁹⁾は独立に、屈折が議論できるように二次元に拡張した。伝送回路線路網の考え方では、通常

の導波路の等価回路の L と C を入れかえたデュアル回路がハイパスフィルターとなることに注目し、ある周波数領域で群速度と位相速度が逆向きとなる、左手系の振る舞いを示すことを示した。実際この領域で FDTD 計算を行うと、平面レンズに対して、ベセラゴレンズの振る舞いが確認されることが真田らによって報告された²⁰⁾。負の屈折を示すバンド幅は、カットオフ周波数とシリーズ（直列）またはシャント（分路）の LC 共鳴のうち低いほうの周波数で決まり、SRR で達成されるバンド幅に比べてずっと大きくなる。これは単位胞どうしの電磁的結合が強いことに由来している。固体電子論において、無機結晶の荷電子電子バンド幅が分子結晶のバンド幅にくらべてずっと大きいことに対応する現象である。

4. 完全レンズとスーパーレンズ

4.1 負の屈折率をもった平板の結像作用

Pendry は、Veselago の議論した平面レンズが、伝搬波のみならずエバネセント波も同様に伝達することを示した²¹⁾。分散関係式は、自由空間で

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\omega^2}{c^2} = k_0^2$$

光源の微細な空間構造は大きな波数に対応し、上の式からそれに垂直な成分の波数を虚数に、すなわちエバネセント波にしてしまう。その結果、従来の結像系ではこれらのモードは探知されない。しかし、近接場顕微鏡 (SNOM) のように近接場モードを抽出できるなら、空間分解の制約は逃れることができる。 z 成分が伝搬するという条件をはずせば、空間分解能はいかようにも大きくできる。三次元空間を二次元で写像するために、このようなことが可能となる。スラブの多重反射を考慮して、反射率と透過率は

$$\lim_{\substack{\epsilon \rightarrow -1 \\ \mu \rightarrow -1}} T = e^{-1k_z d}, \quad \lim_{\substack{\epsilon \rightarrow -1 \\ \mu \rightarrow -1}} R = 0$$

となる。この結果から、まず伝搬波については、物体面 $z=0$ から像面 $z=2d$ までのトータルな位相変化がゼロとなることがわかる。エバネセント波は正の虚部 $k_z = i\kappa$ をもつから、自由空間で減衰したエバネセント波は負の屈折率をもつスラブの中で振幅が大きくなることを意味している。この現象はしばしば「増幅」とよばれるが、エバネセント波はエネルギーを伝搬しないからエネルギーを増しているわけではない。表面に局在したモードを、その端において励起しているにすぎない。さて、伝搬波もエバネセント波も像面で同じであるから、像を再構成するすべての情報はそろっていることになる。その意味で、負の屈折率（真空とインピーダンスマッチさせる場合は誘電率 -1 、透

磁率 -1 で屈折率 -1) をもつスラブを完全レンズとよぶ。界面におけるエバネセント波の大きなエネルギー密度は、ファブリー・ペロー共振器の中の高い電場強度と同様に、時間をかけて蓄積される。完全レンズの条件は、正負の屈折率物質の界面で電氣的表面プラズモン（波数と磁場が垂直）と磁氣的表面プラズモン（波数と電場が垂直）が同時に存在する条件と等価である。

完全レンズは、その条件からのずれに対してはなほだ敏感であることが指摘されている。誘電率の条件が桁違いによくないと、分解能は上がらない。損失をゼロにして完全レンズを実現するために、光学利得を導入することが提案されている。完全レンズの条件が満たされていなくてもある程度の解像度は可能であり、これをスーパーレンズとよぶ。

4.2 準定常極限と銀レンズ

光領域で ϵ と μ を同時に -1 にするのは難しい。Pendry は、問題とする構造のスケールが光の波長よりもずっと小さければ、 p 偏光の透過率は透磁率と無関係となり、誘電率の条件 $\epsilon = -1$ のみが有効となると述べている。すなわち、ただの金属が完全レンズの代役となる。誘電率の虚部が小さいほうがよいので、銀がよい候補となる。銀レンズがないと識別できないダブルスリットパターンが、銀の平板を挿入すると識別できるようになる。完全レンズの解の空間依存性は

$$E(z) = Ae^{-k_z|z|} + Be^{-k_z|z-d|} + Ce^{-k_z|z-2d|}$$

となる。2つの界面からの反射の寄与が打ち消しあって、完全レンズからの反射はゼロとなる。Xiang Zhang (張翔) らは、実際に銀の薄膜を用いてサブ波長の分解能が可能であることを実験的に示している²²⁾。

5. 短波長化に関する話題

5.1 SRR の変形による短波長化

サブ波長分解能を実現する完全レンズの議論は、マイクロ波領域よりも波長の短い可視光領域での利用価値が高い。当然、より短い波長で負の屈折を実現することに対する競争が生じた。テラヘルツでも分割リングが働くことは2004年に確認された²³⁾。しかし、分割リングと細線の組み合わせをスケールダウンするだけでは、光領域の負の屈折の実現は難しいであろうと議論された。周波数が高くなるにつれ金属は完全導体ではなくなり、電場が金属中に侵入するため損失が大きくなるからである。

河田らは、可視光領域における SRR の応答を計算し、銀の SRR であれば実現可能であると論じた²⁴⁾。Shalaev らは、分割リングを最大限に抽象化した金属板片を誘電体

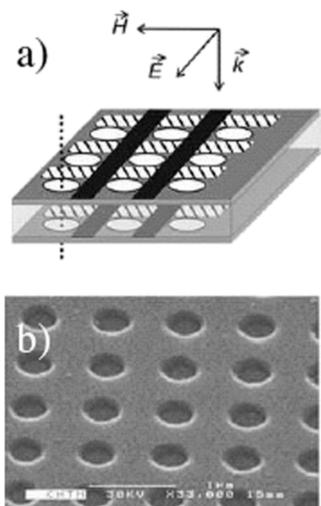


図5 ダブルフィッシュネット構造²⁷⁾.

で挟んでならべた構造において、近赤外での透磁率共鳴、負の屈折の実現に成功した²⁵⁾。Lindenらは同じ構造で測定を行い、負の屈折を実現した²⁶⁾。一方、Shuang Zhang (張霜)らは、図5に示すような金属誘電体金属の三層構造に光干渉リソグラフィで正方配列の孔をあけた構造(ダブルフィッシュネット構造)で負の屈折率を報告した²⁷⁾。図の破線部分が磁場に、黒い部分が電場に応答する。この構造は、金属誘電体金属のサンドイッチ構造とバビネ相反の関係にある。Dollingらは、実質的に同じ構造で性能係数(屈折率の虚部に対する実部の比)が3の共鳴を報告した²⁸⁾。さらに2007年になって、目に見える780 nmの光での負の屈折を報告した²⁹⁾。短波長化が可能となった理由は構造の単純化、損失の少ない銀の使用、デザインの最適化にある。磁気的な応答に限れば、さまざまな可視光領域で共鳴がすでに実現している³⁰⁾。

5.2 薄膜試料における誘電率、透磁率の抽出

光領域では三次元的な構造を作製するのがきわめて困難であるので、負の屈折率は間接的な方法で確認せざるを得ない。Smith, Soukoulis (スクリス)らは、実験的に複素透過率と複素反射率を測定することで、有効誘電率と有効透磁率を決定する手続きを見いだした³¹⁾。与えられた構造に対して転送行列を用いると、複素透過率と複素反射率が得られる。これを再現するような一様な有効媒質があったとして、その誘電率と透磁率を決定するという考え方である。

$$n = \pm \cos^{-1} \left(\frac{1 - r^2 - t^2}{2t} \right)$$

$$Z = \pm \left[\frac{(1+r)^2 - t^2}{(1-r)^2 - t^2} \right]^{1/2}$$

マイクロ波領域では、ベクトルネットワークアナライザ-

によって波の振幅と位相が複素Sパラメーターという形で直接的に求められる。テラヘルツ波領域では、フェムト秒レーザーを用いた時間分解分光法で複素光学定数を求めることができる。光領域では、マッハ・ツェンダー干渉計やマイケルソン干渉計を用いて複素光学定数が求められている^{32,33)}。

後に、このような粗視化は通常議論されるクラウジウス・モソッティの局所場やマクスウェル・ガーネット理論と異なり、粗視化が有効なスケールは個々のユニットとほとんど同じ程度であってもよいことが議論されている³⁴⁾。

6. 最近の展開

メタマテリアルを用いて誘電率と透磁率の空間分布を独立に制御すると、波動インピーダンスを一定に保ったまま、屈折率の分布を変えることができる。このことを利用して、ある領域のまわりを光が迂回するようにデザインして領域内の物体を見えなくする(透明化する)ことができる。これをクロウキング(隠れ蓑)装置とよぶ³⁵⁾。また、非等方的なメタマテリアルによって近接場を伝搬波に変換する技術も開発された³⁶⁾。これらは非常に興味深い展開であるが、紙幅も尽きたので本特集の北野の解説に譲る。

7. 今後の展望

最初のメタマテリアルが誕生して7年。当初はまだまだ先のことと思われていた可視光の負の屈折も、現実のものとなってきた。メタマテリアルによる光の自由な制御は、光学素子の設計に革命を起こすかもしれない。よいイメージをするための光学システムは、今のところあまりにもかさばっている。しかし、応用を念頭におくなら広帯域のメタマテリアルが必要となり、そのためには、これまで主として研究が行われてきた分割リング共振器をベースとしたメタマテリアルから、伝送線路をベースとしたものに移行しなければならないように思われる。このような観点から、物理と電波工学の研究者の交流が特に重要となろう。また、メタマテリアルは自然界の物質では存在しないと定義されることもあるが、化学的な手法をベースにして不均一な構造を形成する技術も多く存在するので、大量に安く生産する技術として期待したい。種々の構造の最適化には、遺伝的アルゴリズムなどの援用も重要であろう。メタマテリアルの研究は、アメリカではDARPA、ヨーロッパではEUのMETAMORPHOSE、中国ではMETA973といった研究サポートがなされている。日本では、残念ながら現時点では、まだ組織的な研究支援が行われていない。今後、状況が改善されることを強く望みたい。

文 献

- 1) S. A. Ramakrishna: "Physics of negative refractive index materials," Rep. Prog. Phys., **68** (2005) 449-517.
- 2) V. G. Veselago: "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ ," Soviet Physics Uspekhi, **10** (1968) 509-514.
- 3) S. A. Ramakrishna and O. J. F. Martin: "Resolving the wave vector in negative refractive index media," Opt. Lett., **30** (2005) 2626-2628.
- 4) J. B. Pendry, A. J. Holden, W. J. Stewart and I. Youngs: "Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures," Phys. Rev. Lett., **76** (1996) 4773-4776.
- 5) J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins and W. J. Stewart: "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., **47** (1999) 2075-2084.
- 6) D. R. Smith and J. B. Pendry: "Homogenization of metamaterials by field averaging," J. Opt. Soc. Am. B, **23** (2006) 391-401. この論文には多くの誤植があるので注意が必要である。
- 7) L. D. ランダウ, V. M. リフシッツ: 連続媒質の電気力学2 (東京図書, 1983).
- 8) R. Marques, F. Medina and R. Rafii-El-Idrissi: "Role of bianisotropy in negative permeability and left-handed metamaterials," Phys. Rev. B, **65** (2002) 144440-1-6.
- 9) D. R. Smith, W. J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser and S. Schultz: "Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity," Phys. Rev. Lett., **84** (2000) 4184-4187.
- 10) R. A. Shelby, D. R. Smith and S. Schultz: "Experimental verification of a negative index of refraction," Science, **292** (2001) 77-79.
- 11) C. G. Parazzoli, R. B. Greigor, K. Li, B. E. C. Koltenbah and M. Tanielian: "Experimental verification and simulation of negative index of refraction using Snell's law," Phys. Rev. Lett., **90** (2003) 107401-1-4.
- 12) H. Kosaka, T. Kawashima, A. Tomita, M. Notomi, T. Tamamura, T. Sato and S. Kawakami: "Super-prism effect in photonic crystals," Phys. Rev. B, **58** (1998) R10096-10099.
- 13) M. Notomi: "Theory of light propagation in strongly modulated photonic crystals: Refraction-like behavior in the vicinity of the photonic band gap," Phys. Rev. B, **62** (2000) 10696-10705.
- 14) H. J. Lezec, J. A. Dionne and H. A. Atwater: "Negative refraction at visible frequencies," Science, **316** (2007) 430-432.
- 15) P. M. Valanju, R. M. Walser and A. P. Valanju: "Wave refraction in negative-index media: Always positive and very inhomogeneous," Phys. Rev. Lett., **88** (2002) 187401-1-4.
- 16) D. R. Smith, D. Schurig and J. B. Pendry: "Negative refraction of modulated electromagnetic waves," Appl. Phys. Lett., **81** (2002) 2713-2715.
- 17) S. Foteinopoulou, E. N. Economou and C. M. Soukoulis: "Refraction in media with a negative refractive index," Phys. Rev. Lett., **90** (2003) 107402-1-4.
- 18) L. Liu, C. Caloz, C. Chang and T. Itoh: "Forward coupling phenomena between artificial left-handed transmission lines," J. Appl. Phys., **92** (2002) 5560-5565.
- 19) A. Grbic and G. V. Eleftheriades: "Experimental verification of backward-wave radiation from a negative refractive index metamaterial," J. Appl. Phys., **92** (2002) 5930-5935.
- 20) A. Sanada, C. Caloz and T. Itoh: "Planar distributed structures with negative refractive index," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., **52** (2004) 1252-1263.
- 21) J. B. Pendry: "Negative refraction makes a perfect lens," Phys. Rev. Lett., **85** (2000) 3966-3969.
- 22) N. Fang, H. Lee, C. Sun and X. Zhang: "Sub-diffraction-limited optical imaging with a silver superlens," Science, **308** (2005) 534-537.
- 23) T. J. Yen, W. J. Padilla, N. Fang, D. C. Vier, D. R. Smith, J. B. Pendry, D. N. Basov and X. Zhang: "Terahertz magnetic response from artificial materials," Science, **303** (2004) 1494-1496.
- 24) A. Ishikawa, T. Tanaka and S. Kawata: "Negative magnetic permeability in the visible light region," Phys. Rev. Lett., **95** (2005) 237401-1-4.
- 25) V. M. Shalaev, W. S. Cai, U. K. Chettiar, H. K. Yuan, A. K. Sarychev, V. P. Drachev and A. V. Kildishev: "Negative index of refraction in optical metamaterials," Opt. Lett., **30** (2005) 3356-3358.
- 26) S. Linden, C. Enkrich, G. Dolling, M. W. Klein, J. Zhou, T. Koschny, C. M. Soukoulis, S. Burger, F. Schmidt and M. Wegener: "Photonic metamaterials: Magnetism at optical frequencies," IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., **12** (2006) 1097-1105.
- 27) S. Zhang, W. J. Fan, N. C. Panoiu, K. J. Malloy, R. M. Osgood and S. R. J. Brueck: "Experimental demonstration of near-infrared negative-index metamaterials," Phys. Rev. Lett., **95** (2005) 137404-1-4.
- 28) G. Dolling, C. Enkrich, M. Wegener, C. M. Soukoulis and S. Linden: "Low-loss negative-index metamaterial at telecommunication wavelengths," Opt. Lett., **31** (2006) 1800-1802.
- 29) G. Dolling, M. Wegener, C. M. Soukoulis and S. Linden: "Negative-index metamaterial at 780 nm wavelength," Opt. Lett., **32** (2007) 53-55.
- 30) W. Cai, U. K. Chettiar, H. Yuan, V. C. de Silva, A. V. Kildishev, V. P. Drachev and V. M. Shalaev: "Metamagnetics with rainbow colors," Opt. Express, **15** (2007) 3333-3341.
- 31) D. R. Smith, S. Schultz, P. Markos and C. M. Soukoulis: "Determination of effective permittivity and permeability of metamaterials from reflection and transmission coefficients," Phys. Rev. B, **65** (2002) 195104-1-5.
- 32) V. P. Drachev, W. Cai, U. Chettiar, H.-K. Yuan, A. K. Sarychev, A. V. Kildishev, G. Klimeck and V. M. Shalaev: "Experimental verification of an optical negative-index material," Laser Phys. Lett., **3** (2006) 49-55.
- 33) G. Dolling, C. Enkrich, M. Wegener, C. M. Soukoulis and S. Linden: "Simultaneous negative phase and group velocity of light in a metamaterial," Science, **312** (2006) 892-894.
- 34) D. R. Smith, D. C. Vier, T. Koschny and C. M. Soukoulis: "Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials," Phys. Rev. E, **71** (2005) 036617-1-11.
- 35) D. Schurig, J. J. Mock, B. J. Justice, S. A. Cummer, J. B. Pendry, A. F. Starr and D. R. Smith: "Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies," Science, **314** (2006) 977-980.
- 36) Z. Liu, H. Lee, Y. Xiong, C. Sun and X. Zhang: "Far-field optical hyperlens magnifying sub-diffraction-limited objects," Science, **315** (2007) 1686.

(2007年6月18日受理)