

## 8 メタマテリアルとメタサーフェス

### メタマテリアルとは

メタマテリアルとは、電磁波の波長以下のユニットセルの集合体を、ある有効な光学定数を持った物質（マテリアル）とみなすことで、自然界にはないような光学定数をもった光材料を実現しようとする研究領域である。メタマテリアル研究は、1968年に Veselago が、誘電率と透磁率が同時に負になるような媒質では屈折率が負になり、電磁波の伝搬が許されることを見出した[Sov. Phys. Usp. 10(4), 509 (1967).]ことに端を発する。長い年月の後、1999年に Pendry がスプリットリング共振器による負の透磁率を提案[IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 47 (11): 2075 (1999).]、さらにそれを用いて複屈折率材料を構成することで完全レンズが可能になることを発表した[Phys. Rev. Lett. 85, 3966 (2000).]そして、Smith が2001年にスプリットリング共振器とワイヤーを組み合わせた構造を用いてマイクロ波領域で負の屈折率媒質を実現した[Science 292, 77 (2001)]. これらをきっかけにメタマテリアルの研究は爆発的に広まった。長らく眠っていた Veselago の理論が現代の理論と実験によって掘り起こされたことになる。Pendry と Smith はその後クローキングの理論と実験も報告している[Science 314, 977 (2006).]。当初は「負の屈折率」をもった物質を作ることがその主眼であった。メタマテリアルは、メタ原子と呼ばれるサブ波長構造のデザインによってその応答が決まる点に特徴がある。そのため原理的には、メタマテリアルでは周期性を必要とせず、メタ原子がランダムに分散したような構造でも問題ないが、実際には作製の都合上の周期的な構造が多く用いられる。メタ原子は波長よりも小さなスケールの構造であるため、メタマテリアルは“有効な”光学定数によって議論することができ、これを有効媒質近似と呼ぶ。その後さまざまな方向に研究が派生し、今は有効屈折率などとは関係なく、サブ波長構造によって新しい光機能を実現するためのパラダイムになっている。

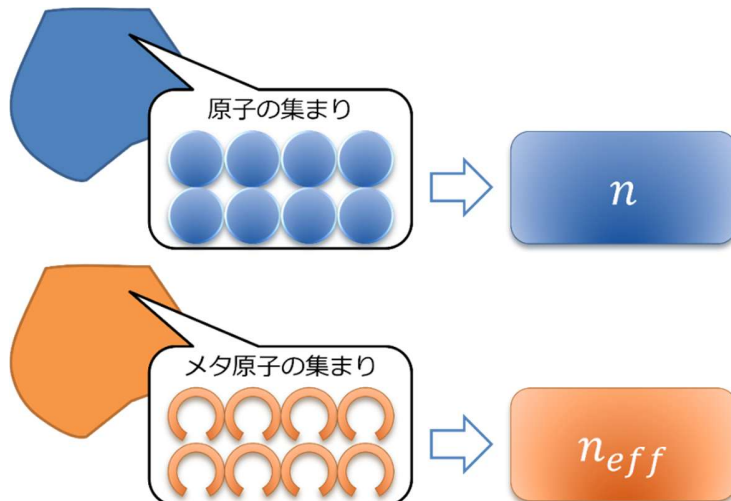
### 有効媒質近似

メタマテリアルは、その構造のスケールが動作波長よりも小さい（回折光がない）ことから、有効光学定数で特徴づけられる有効媒質として扱われる。これは普段我々が、屈折率や誘電率を用いて物質の光学応答を議論していることとなんら変わらない。我々が対象とする媒質は実際には空間的に一様ではなく、原子や分子の集合体である。誘電率を用いた議論ができるのは、

更新日：2026/04/03

ナノフォトニクスゼミ 森竹勇斗

原子の構造に対し電磁波の波長が十分に長いからである。メタマテリアルにおいても、同様の議論から構造が波長よりも十分に小さいならば、有効光学定数をもった、一様な有効媒質として議論することが可能である。



2種類の媒質が混ざり合った系における有効誘電率は、メタマテリアルが誕生する以前から Maxwell-Garnet [Philos. Trans. R. Soc. Lond. A 203, 385 (1904).] によって求められている。Maxwell-Garnet は、Clausius-Mosotti の式を元に、ある媒質中に別の媒質でできた微小球が分散している系における有効誘電率を求めた。その後、Maxwell-Garnet の理論は Braggeman によって改良が加えられ、Braggeman の理論として知られている [Ann. Phys. Berlin 24, 636 (1935).]。Maxwell-Garnet および Braggeman の理論のひとつの極限として考えることができる図のような多層膜系における有効誘電率について紹介しておこう [Phys. Rev. E, 74, 046618 (2006).]。この時有効誘電率はふたつの方向でそれぞれ

$$\varepsilon_{\parallel} = f_1 \varepsilon_1 + f_2 \varepsilon_2, \frac{1}{\varepsilon_{\perp}} = \frac{f_1}{\varepsilon_1} + \frac{f_2}{\varepsilon_2} \quad (f_1 + f_2 = 1)$$

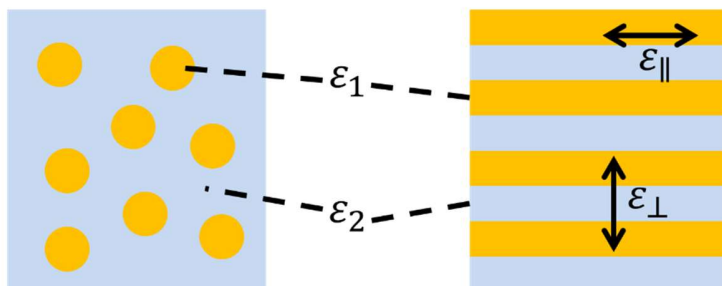
となる。ここで  $f$  はそれぞれの材料の体積比である。最初の式は、単に体積比をとったものであり、コンデンサで言えば並列の場合に相当する。また、二番目の式は、誘電率の逆数の体積比をとったもので、コンデンサで言えば直列に接続したときと同じである。ちなみに、2種類以上の多層膜で構成されているときは

$$\varepsilon_{\parallel} = \sum_{i=1}^n f_i \varepsilon_i, \frac{1}{\varepsilon_{\perp}} = \sum_{i=1}^n \frac{f_i}{\varepsilon_i} \quad \left( \sum_{i=1}^n f_i = 1 \right)$$

と一般化することができるが、周期構造（多層膜の一単位）が動作波長よりも（十分に）小さい必要がある。

### Maxwell-Garnet

### 多層膜

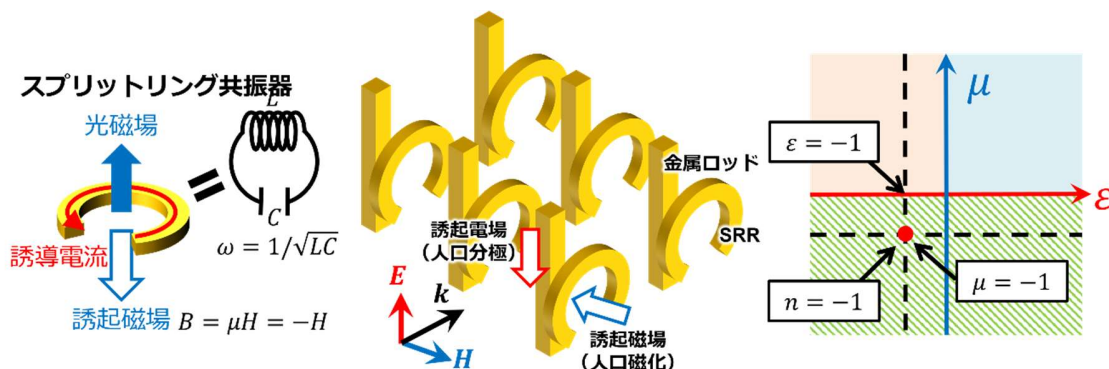


### スプリットリング共振器と負の屈折率

ここでもっとも有名なメタマテリアル構造であるスプリットリング共振器（SRR: Split Ring Resonator）を紹介しておこう。図が SRR の模式図である。このリングを貫く向きに磁場をかけると誘導電流が生じ、その誘導電流はさらに磁場を誘起する。これは、物質における磁化をミミックしていると考えることができる。SRR は共振周波数を持ちその周波数は、SRR を LC 回路として考えることで計算することができる。この共振周波数の前後の周波数では、正負に巨大な人工磁化が誘起される（ローレンツ型の共振を思い出してほしい）。ここで最初に印加した磁場と人工磁化の向きが逆の場合、有効な透磁率は実効的に「負」になっていると考えることができる。このようにして作った透磁率が-1 のものに、金属などを用いて誘電率-1 のものをまぜれば、

$$n = \sqrt{\epsilon\mu} = (e^{i\pi}e^{i\pi})^{\frac{1}{2}} = e^{i\pi} = -1$$

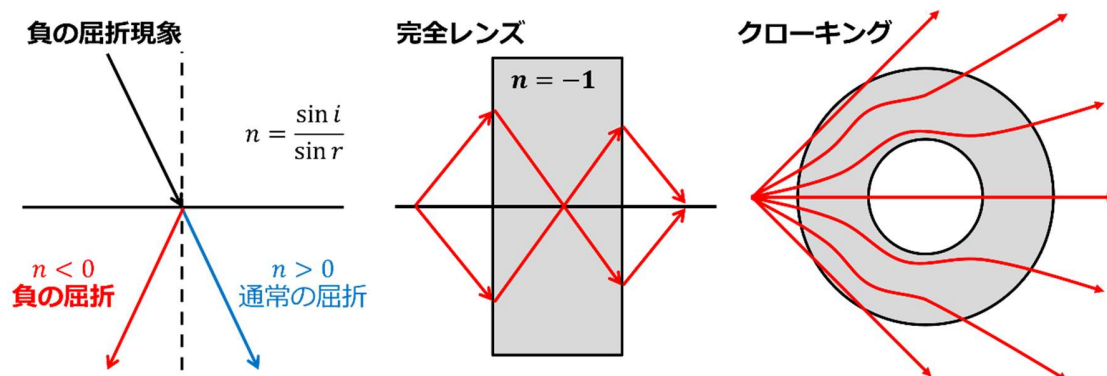
となって負の屈折率の物質が実現される。実際 Smith は 2001 年に、SRR とワイヤーを組み合わせた構造を用いてマイクロ波領域で負の屈折率媒質を実現した。



更新日：2026/04/03

ナノフォトニクスゼミ 森竹勇斗

このような負の屈折率媒質では、図のように負の角度に光が屈折する「負の屈折」が起こる。これを用いると完全レンズと呼ばれる原理的に（回折限界を超えて）解像度が無限に細かいレンズが構成できることが Pendry から提案された。負の屈折率媒質では、近接場が増幅されるため、回折限界を超えた情報の転送が可能になり、物体と1対1対応する像が結像される。また、クローキング（隠れ蓑技術）もはじめ GHz 帯で実証され大きな注目を集めた。隠したいものがある領域を光が迂回するように屈折率分布を作ることで、あたかもそこに物がないかのようにミセス技術である。これを可視光で実現できれば、夢の透明マントができるということで大きな話題となった。しかし、現在では、実際の負屈折率媒質では損失が無視できないこと[1]や、複雑な構造を大面積で作る技術が未発達のために、これらのキラアPLICATIONは実用化には至っていない。



### ナノフォトニクスにおけるメタマテリアル

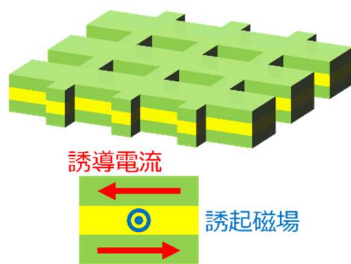
メタマテリアルの初期の実験は GHz 帯などの波長の長い領域で行われることが多かったが、そこで培ったデザインのアイデアを用い、構造を小型化していくことで動作波長を THz、赤外、可視まで縮める努力がなされてきた。例えば、SRR の小型化は多くの研究例があり、近赤外や可視光に近いところまで小型化が行われた。この時構造のサイズは数百ナノメートルのサイズであり、作製は電子線描画を用いた高度なものになる。このサイズになると、GHz でやられていたような 3 次元的な構造を作るのは難しいので、二次元的に並んだアレイが作られるようになる。またこの波長域で金属のナノ構造を作るとその共鳴は表面プラズモンモードを活用することになる。このように可視～近赤外の金属ナノ構造の二次元アレイは、特にプラズモニックメタマテリアルと呼ばれ、ちょうどプラズモニクスという言葉が生まれた時期と重なったこともあり、研究が盛んにおこなわれた。（このあたりの当時の状況を私は肌で感じてい

更新日：2026/04/03

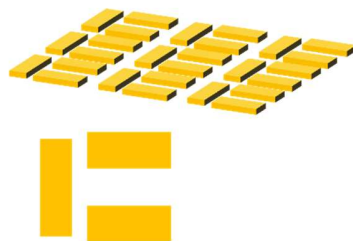
ナノフォトニクスゼミ 森竹勇斗

ないので、そのうち田中拓男先生に聞いてみようと思う) とはいえ、このような単純な微細化は、複雑な構造では難しく工夫が必要となった。例えば負の屈折率媒質は、ダブルフィッシュネットと呼ばれる構造を用いて光学領域において実現された。これはSRRを直接は用いていないがそのアイデアをうまく作りやすい形に昇華した例である。また、平面的な2次元アレイ構造が用いられたために、有効屈折率の議論をせずに、二次元的にメタ原子を配列することで起こる様々な光学応答の探求へ研究が進展した。(今思えばこれがメタサーフェスの始まりだった) その結果、負の屈折以外にも、Fano 共鳴と呼ばれる鋭いスペクトル応答を示す構造や、ハイパボリックメタマテリアル、EIT メタマテリアル、カイラルメタマテリアルなど、数えきれないほどの様々な人工光学応答を示すメタマテリアルが生まれていった。これらの多くが、金属構造からなる共振器を配列することにより実現されていたが、金属の持つ損失を克服するために、誘電体を用いて同等のことを行う研究が盛んになった(今ではミートロニクスとも呼ばれる) このようにして二次元的な共振器アレイのことをいつしか、メタマテリアルと呼ぶようになり、この流れはメタ表面の研究へと発展していく。

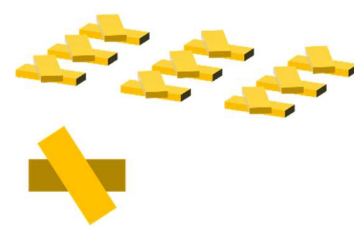
ダブルフィッシュネット構造



EIT構造



カイラル構造



## メタサーフェスとは

ここでは、いわゆる位相勾配型のメタサーフェスについて紹介する。先にも述べたように、メタサーフェスという言葉は元をたどると2次元化したメタマテリアル(3次元構造)に対して用いられた言葉である。が、狭い意味ではこの後の別位相勾配型のことをメタサーフェスと呼ぶ(と思う)。

レンズやプリズムなどの光学素子は、光の波面を制御することにより、光の集光や屈曲などの機能を実現している。例えばレンズでは、材料の厚みを連続的に変化させることで、隣り合う各点を通る光の光路長に差を作り、波面を少しずつずらすことによって光を集光させている。

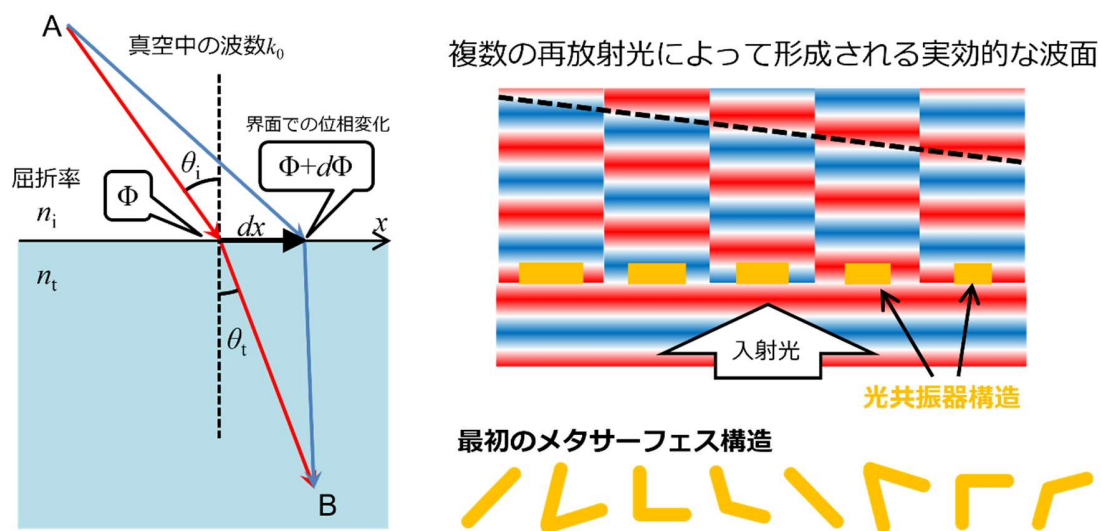
メタサーフェスとは、このような波面の制御を、サブ波長の微細な光共振器の配列を用いておこなうものである。サブ波長共振器による波面制御のアイデアは最初[Yu et al. Science 334, 333 (2011).]によって提案され、メタサーフェスと呼ばれるようになった。図のように少しずつ形状の異なる光共振器構造並んでいる状態を考える。光が入射すると、各共振器で共鳴が起こり、光のエネルギーが共振器に蓄えられた後、再放射される。この時、隣り合う共振器間で再放射のタイミングが異なる（初期位相が異なる）と、波面のずれが生じる。このずれを徐々に変化させることで、実効的に曲がった波面を作り出すことができる。この原理は、ホイヘンスの原理と全く同じであるが、各素元波を自在に制御できる点が新しい。この原理を用いると、原理的には、光をあらゆる方向（負の角度を含む）に曲げたり、集光したりできる。

最初提案されたメタサーフェスは、図のような時計の針のような構造を並べたものであった。このように少しずつ形を変化させることで、共鳴時の位相変化をなめらかに変化させることができる。この構造は、サブ波長共振器の共鳴を用いる「共鳴型」であった。サブ波長構造は、光の位相を0から $2\pi$ まで制御できるものが理想であるが、共鳴型では難しい場合がある。それを克服するのが、伝搬型と呼ばれるもので、共鳴型よりも伝搬方向に長い構造を用いる。また、メタサーフェスには効率がある。入射したすべての光がサブ波長構造と結合すれば100%の効率が得られるが、実際には難しい。例えば、共鳴時に反射する成分や、共鳴せずに透過してってしまう光が存在し、それによって効率が落ちる。また、構造自体に損失があると、透過率を下げる要因となる。そのため、のちに述べるように、メタレンズと呼ばれるレンズ応用ではほとんどの場合、材料損失のない誘電体を用いられる。ただし、誘電体の場合、一般に可視域で高い屈折率をもつ材料は少なく、共鳴型だと散乱断面積が稼げないことがあるので伝搬型が多く用いられる。

メタサーフェスでも用いられる微細な光共振器は、メタマテリアルの世界でよく研究されてきたものであるため、その知見を活かすことで、適切な構造の設計をおこなうことができ、メタマテリアルの研究がメタサーフェスの研究に地続きでつながっていった。光領域のメタマテリアルの研究はほとんどの場合、二次元的な構造で行われていた。そのため、もともとメタマテリアルと呼んでいた構造を、メタサーフェスの登場以降、メタサーフェスと呼んでいることがある。

また、メタサーフェスは日本語では「メタ表面」と呼ばれることもある。メタ「マテリアル」と呼んでいたことを考えると、メタサーフェスと呼ぶ方が自然な気がするが、どちらでもいいと思う。

メタサーフェスは、平面的な構造によって光を自在に制御しようという方向性をより鮮明に打ち出した。このころから、メタマテリアルと退位するような形で、平面人工構造を用いた分野を「フラットオプティクス (Flat optics)」という呼び方が流行った (最近あんまり聞かないかも?)。



### 一般化されたスネルの法則

メタサーフェスの原理について、数式を使って解析してみよう。この解析結果では、より「一般化されたスネルの法則」が導かれる。スネルの法則は、屈折率の異なる物質の界面における透過波の屈折角を与える。ここで、「界面における位相変化が位置依存性をもつ」という条件を加えることで、「一般化されたスネルの法則」を導くことができる。図のような、点 A を出発して界面で屈折した後、点 B まで到達する二つの光路を考える (図赤線と青線)。この界面の特徴は、光が屈折する位置によって、光の位相変化が異なる点である。赤線の場合には、界面において  $\phi$  だけ位相が変化する一方、青線では  $\phi + d\phi$  だけ位相が変化する。そのため、A から B に到達する際の二つの光路間の位相差  $\Delta$  は、以下のように書ける。

$$\Delta = [k_0 n_t \sin(\theta_t) dx + \phi] - [k_0 n_i \sin(\theta_i) dx + (\phi + d\phi)]$$

ここで、 $dx \rightarrow 0$  として二つの光路を無限に近づけると、位相差  $\Delta$  は 0 になるはずなので

$$k_0 n_t \sin(\theta_t) - k_0 n_i \sin(\theta_i) = d\phi/dx$$

更新日：2026/04/03

ナノフォトニクスゼミ 森竹勇斗

が導かれる。これが、「一般化されたスネルの法則」である[Yu et al. Science 334, 333 (2011).]. 位相変化の位置依存性 $d\phi/dx$ が0の場合は、運動量の保存を表す通常のスネルの法則になる。一方、位相変化の位置依存性 $d\phi/dx \neq 0$ の場合には、光は界面から運動量 $d\phi/dx$ を授受することによって、通常とは異なる方向に屈折を起こすことがわかる。

## メタレンズ

メタサーフェスの最も有望な応用例（すでに実用化されている）はメタレンズである。メタサーフェスの原理を応用すると、光を特定の方向にまげるだけでなく、特定の場所に集光したり、発散させたりと、波面を自在に操ることができる。通常のガラスなどでできたレンズは、波面を制御するために厚さの異なる形状を用いているため、曲線形状かつ厚みが必要である。位相差を与えることが本質であることに着目し、薄く軽量のレンズを実現したものにフレネルレンズがある。フレネルレンズは大雑把に言ってしまうとメタレンズと原理は同じである。しかし、光の波長に比べれば大きなスケールで構造が形成されており、その点がメタレンズと大きく異なる。この違いは、より複雑な光機能において重要になる。つまり、メタレンズでは、波長以下（程度）のスケールで空間的に位相をコントロールすることで、単なる集光機能だけでなく、複雑な偏光制御や分散制御などの、そもそも通常のレンズでは不可能な機能を付与することができる。この意味で、メタレンズの科学技術的な醍醐味は、薄型化・軽量化よりも、多機能化にあると私は思う。例えば、RGBの色ごとに別々の位置に集光するレンズや、光の偏光成分ごとに異なる向きに光を曲げる素子など、非常に多彩な機能が実現されている。

メタレンズの研究ではCappasoのグループが世界的に有名で、TiO<sub>2</sub>を用いたサブ波長構造でメタレンズを実現した。また、2026年現在、メタレンズは様々な企業で研究が行われている。私の印象では、光学技術関連の大きな企業では、メタレンズ・メタサーフェスは、単なる流行りを超えて、当然技術開発するテーマになってきているように思う。現在では、メタレンズ設計や作製技術そのものは、ある程度確立された情報やツールを誰でも使える状況になっており、メタレンズ技術をどこに使うか、という点に焦点が当たっているように思う。そういった流れで言うと、メタレンズそのものの基礎研究はすでに終焉しているのかもしれない。

また、メタサーフェス・メタレンズは当然、光領域だけでなく電波などの他波長帯でも活用でき、そういった領域で技術開発を行っている企業もある。

更新日：2026/04/03

ナノフォトニクスゼミ 森竹勇斗