

Meta-Material

# メタマテリアル班

「物質を超えた“物質”を探る」

## 班紹介

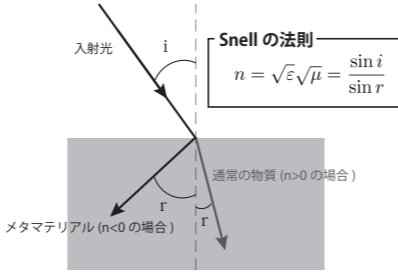
### ・メタマテリアルって何？

何をメタマテリアルと呼ぶかに関しては (wikipedia などでも) 諸説ありますが、私たちが考える「メタマテリアル」とは光を含む電磁波や、音波などの波に対して自然界の物質には無い応答を示す人工物質のことを指すものとします。

さて、その中で最も有名で、長いこと (といっても 2000 年以降の話ですが) 研究されているのは、電磁波に対して「負の屈折率」を持つ物質です。電磁波に対する物質の応答を示す変数である誘電率  $\epsilon$  と透磁率  $\mu$  を操作することで、これまではありえないとされてきた負の屈折率を実現することが可能になりました。これによって、工学的にもこれまで不可能と思われていた「スーパーレンズ」や「透明マント」といった面白い応用例がいくつも発表され、注目を浴びています。

ここまでは、電磁波の領域に限って話をしてきましたが、私たちの定義から言えば、この「メタマテリアル」とは電磁波の領域に限ったものではありません。音波や水面波な

どの種々の波動に対しても同様に物質の微細な配置を変化させることにより、電磁波のように「負の屈折率」を実現させたり、通常の物質ではありえない応答を示させたりすることが可能です。



### ・活動概要

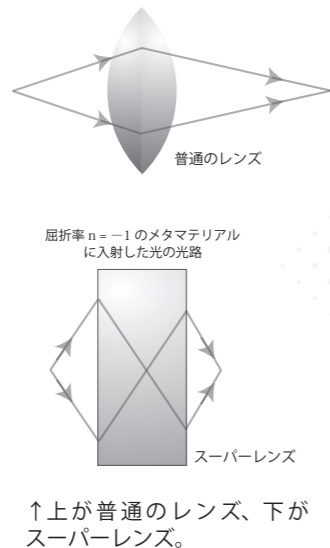
今回私たちの班では、電磁波の代わりに、電流 (電圧) と音波という二つの“波”を考えてそれぞれでどのように物質がこの“波”に対して反応するのかを解析しました。したがって、この結果はより広く、電磁波やその他の波動現象一般 (水面波など) に対して適用できるものであると考えられます。どのように電流や音波を制御し解析するか、ということに関してはそれぞれの実験内容の欄で書くことにします。

レンズ」と呼ばれます。

しかし、実際に電磁波でこのような「スーパーレンズ」を作成することには多くの困難を伴います。例えば、先ほどの図では、実際はレンズ内部では電磁波は減衰していきます。結果、焦点での集光度が悪くなり、レンズとしての性能も低下します (そして、あらゆる物体の放つ光を集光することはできなくなります)。

そこでこの実験では、より理想的な「スーパーレンズ」として、音波に対するメタマテリアルを考えることにします。音波の領域でも右図のような特定の構造をもった物質を考えることで、波長以下の大きさの音波を集光させることが可能になります。

私たちの班では右上の左側の図を簡略化したモデルとしてその右側の図のような 1 次元の構造をもった物体を考え、それに空間に局在した音波を入れることでその特性を解析しました。実際にこれが「スーパーレンズ」として機能しているなら、波長以下の解像度の映像 (ここでは音波の強度として得られますが) が音波の侵入してきたのと反対側から取り出せるはずで



↑上が普通のレンズ、下がスーパーレンズ。

## 実験内容

### ➤音響メタマテリアル

「音響メタマテリアル」とはその名の通り、音波に対して、自然界の物質にはないような応答を示す物質のことを指します。今回、私たちの班では、電磁波の領域で言う「スーパーレンズ」というメタマテリアルを作成して解析を行いました。

### ・スーパーレンズ

通常のレンズは右上の図のように光を集光しています。ある一定の (波に特有の) 波長と呼ばれる大きさより小さい物体はレンズを用いて拡大し、見ることができないことが知られています。これに対して、スーパーレンズ (または完全レンズ、パーフェクトレンズ) は、右下の図のような光路により集光します。スーパーレンズを用いると任意の大きさの物体 (の放つ光) を集光して見ることができます。このため、このような負の屈折率を用いたレンズは「スーパー

## Column Space



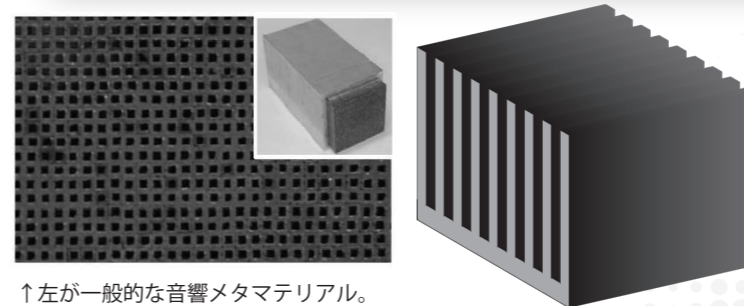
### 「メタマテリアルの発想」

現在知られているメタマテリアルのような物質が存在しても良いのではないかと初めに提唱したのはベセラゴでした。彼は 1967 年に、物質の電磁波 (光) に対する応答を決める定数である誘電率  $\epsilon$  と透磁率  $\mu$  がともに負の値をとる場合を考え、その末に “屈折率  $n = \sqrt{\epsilon\mu}$  が負の値をとり、真空中から入射した電磁波は境界面で「く」の字型に屈折するに違いない。” という結論を得ました。しかし、実際にそのような数年間の探索にもかかわらず、そのような物質は自然界に存在しませんでした。その理由は透磁率  $\mu$  が自然界のほとんどの物質で真空の透磁率に近い値をとっていたために  $n$  が負の値をとることなどできなかったからです。

その後の長い間、このアイデアは忘れ去られていましたが、2000 年にブレークスルーがおきます。ある特定の構造をもった金属を周期的に配置することで、透磁率、誘電率を負にできるという理論が Pendry によって発表されたのです。

メタマテリアルの特性を利用すれば、「透明マント」や「スーパーレンズ」といった、工学的な応用も可能なが示され、大きな反響を呼びました。

そして、現在に至るまでマンガや映画の世界で出てくるような夢の領域 (可視光領域) での屈折率制御を目指して世界中の科学者がメタマテリアルの研究を行っているというわけです。



↑左が一般的な音響メタマテリアル。→右が一次元化したより簡単なモデル。

### ➤電気回路シミュレーション

先ほども説明したように、「メタマテリアル」という考え方は波動とらえられるようなものになら、広く一般に適用できます。この実験では、下の表に示したような対応関係から、光や音波の代わりに電流を波としてとらえ、その「波」が入射する物質の代わりに、電気回路を用意することで物質内部での波動の様子を考察します。

### ・なぜ電気回路？

さて、ここで伝搬する波として電磁波 (光) ではなく、電流を選び、波が入射する物質 (媒質) としてわざわざ電気回路を利用する理由を説明しておきましょう。

第一に、電磁波に対して特異な応答を示す物質を作るよりも電気回路を用いる方がより簡単に伝搬を決定する物理定数 (下記の表参照) の値を簡単に変えることができるからです。

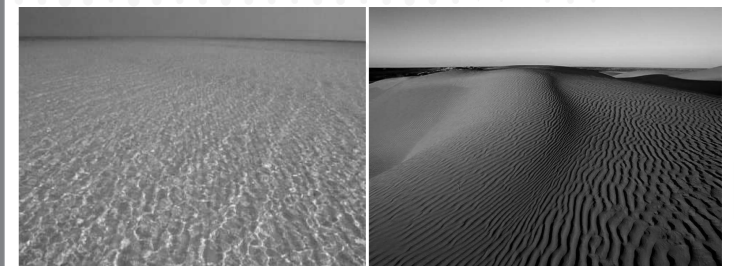
	電磁波 (光)	音波	電気回路
入射 (伝搬) する波動	電場・磁場	空気や水などの振動	電流・電圧
伝搬の様子を決める物理定数	誘電率 $\epsilon$ 透磁率 $\mu$	物質の粘性係数 や空間配置	回路の抵抗・ コンデンサー・ コイルの値

各々の波動において伝搬するものと、その伝搬速度などを決める物理定数

(コラムで述べていますが) 透磁率  $\mu$  などは自然界に存在するほとんどの物質で真空での値 1 とほぼ同じ値をとり、簡単には変えることができません。これに対して、コンデンサーのキャパシタンス  $C$  やコイルのインダクタンス  $L$  は様々な値を選ぶことができます ( $\mu$  と  $L$  がおおよそ対応関係にあります。が、 $\mu$  が 1 前後の値しか取れなかったのに対して、 $L$  は 1 nH~100 mH の間の自由な値 [n は 10 億分の 1 の意味] をとることができます)。

第二の理由として、電磁波は波として実感することが難しいということがあります。下の図のように水面波や砂漠にできる波面は実際に目で見て波が伝わっていることが確認できますが、電磁波 (光) や音波でこれを実感できることはほとんどありません。これは言うまでもなく、波の伝わる速度 (伝搬速度)  $v$  が大きいためですが (電磁波なら  $v = 3.00 \times 10^8$  m/s、空気中の音波なら  $v = 343$  m/s 程度です) 実際に見えないのは面白くない! ということで電気回路によるシミュレーションを考えました。これを用いれば  $v \approx 0.2$  m/s 程度まで伝搬速度を下げるのが可能です。この程度の値なら人間の目でも十分に「波が伝搬している」様子が見えることとなります。

実際にどのような回路を用いれば、物質中の電磁波の伝搬を再現できるのかといった詳しいことは付録の DVD に掲載することにしますのでそちらをご覧ください。



↑左は水を伝える波。右は吹き付ける風によってできる砂漠の風紋。これらは伝搬速度が小さいので波の様子が目に見えてわかる。

## DVD収録内容

1. 実験動画
2. 実験とそれに関する理論の解説