

---

---

メタマテリアル、メタサーフェスの  
設計・作製と応用技術

---

---

SAMPLE

執筆者一覧（敬称略）

第1章

高原 淳一 大阪大学 大学院工学研究科 教授

第2章

●第1節

岩長 祐伸 国立研究開発法人物質・材料研究機構 機能性材料研究拠点 主幹研究員

●第2節

高原 淳一 大阪大学 大学院工学研究科 教授

長崎 裕介 大阪大学 大学院工学研究科

●第3節

田中 拓男 国立研究開発法人理化学研究所 田中メタマテリアル研究室 主任研究員／  
徳島大学 ポストLED フォトニクス研究所 客員教授

●第4節

佐野 栄一 北海道大学 名誉教授

●第5節

松井 龍之介 三重大学 大学院工学研究科 准教授

●第6節

岡本 敏弘 徳島大学 ポストLED フォトニクス研究所 准教授

●第7節

納谷 昌之 富士フイルム株式会社 R&D 統括本部 解析技術センター 研究主幹

第3章

●第1節

金森 義明 東北大学 大学院工学研究科ロボティクス専攻 教授

●第2節

岩見 健太郎 東京農工大学 大学院工学研究院 准教授

●第3節

玉山 泰宏 長岡技術科学大学 技学研究院 准教授

●第4節

堀 俊和 福井大学 産学官連携本部 客員教授／IEEE Life Fellow, IEICE Fellow

●第5節

宮崎 英樹 国立研究開発法人物質・材料研究機構 機能性材料研究拠点 グループリーダー

●第6節

久保 若奈 東京農工大学 大学院工学府 電気電子工学専攻 特任准教授

# 目 次

## 第1章 | メタマテリアル、メタサーフェスの原理・特徴

1. はじめに …… 1
2. メタマテリアル …… 2
  - 2.1 メタマテリアルとは …… 2
  - 2.2 有効媒質 …… 3
  - 2.3  $\epsilon$ - $\mu$  ダイアグラム …… 3
  - 2.4 メタ原子の構造と負屈折 …… 7
  - 2.5 ハイパボリック・メタマテリアル …… 9
3. メタサーフェス …… 11
  - 3.1 メタマテリアルからメタサーフェスへ …… 11
  - 3.2 メタ原子による離散的位相制御 …… 13
  - 3.3 メタ原子によるミー散乱 …… 15
  - 3.4 メタ原子による完全吸収 …… 19
4. メタマテリアル、メタサーフェスの応用 …… 21
  - 4.1 バルクメタマテリアル …… 21
  - 4.2 メタサーフェス …… 21
5. 課題と今後の展望 …… 24

## 第2章 | メタマテリアル、メタサーフェスの設計・作製

### 第1節 ブラズモニック・メタサーフェスの設計と作製

1. はじめに …… 31
2. 設計 …… 32
  - 2.1 目的の設定 …… 33
  - 2.2 材料とナノ構造の選定 …… 35
  - 2.3 構造要素の特性解析 …… 35
  - 2.4 メタサーフェス構造の構成 …… 36
3. 作製 …… 37
4. 機能評価 …… 37

5. おわりに …… 38

## 第2節 単結晶シリコンを用いた誘電体メタサーフェスの設計と作製

1. はじめに …… 41
2. 誘電体ミーム共振器による散乱の制御 …… 42
3. 誘電体ミーム共振器による反射スペクトルの設計 …… 45
4. 単結晶シリコンメタサーフェスの作製 …… 46
  - 4.1 誘電体材料 …… 46
  - 4.2 微細加工 …… 47
5. 単結晶シリコンメタサーフェスの光学特性 …… 48
6. まとめと展望 …… 50

## 第3節 自己組織化を用いたメタマテリアルの作製技術 —3次元メタマテリアルをめざして

1. はじめに …… 53
2. 等方的光学特性のための3次元メタマテリアル …… 53
3. 非自己組織化3次元レーザー加工技術 …… 55
4. DNAを用いた自己組織化法 …… 57
5. 磁場を用いた自己組織化法 …… 61
6. トップダウンと自己組織化との融合技術 …… 62
7. おわりに …… 65

## 第4節 電波領域でのメタマテリアル（メタサーフェス）の設計・作製

1. はじめに …… 69
2. 右手／左手複合伝送線路 …… 71
3. 人工磁気導体 …… 73
4. 人工磁気導体としての2次元CRLH伝送線路 …… 76
5. 人工誘電体 …… 78
6. 半導体集積回路へのメタマテリアルの導入 …… 80
7. おわりに …… 84

## 第5節 ハイパボリックメタマテリアルの設計・作製

1. はじめに …… 89
2. ハイパボリックメタマテリアルの設計 …… 91
  - 2.1 異方性媒質中の光の分散関係 …… 91

- 2.2 ハイパボリック媒質中の光の分散関係 …… 92
- 2.3 ハイパボリックメタマテリアルの設計 …… 93
- 3. ハイパボリックメタマテリアルの作製 …… 97
  - 3.1 微細加工によるハイパボリックメタマテリアルの作製 …… 97
  - 3.2 天然材料にみられるハイパボリック媒質 …… 98
- 4. おわりに …… 100

## 第6節 微小球リソグラフィ法を用いたメタサーフェスおよびメタマテリアルの作製

- 1. はじめに …… 103
- 2. 微小球リソグラフィ法を用いた金属 SRR の作製 …… 104
  - 2.1 NSL 法を用いた金属 SRR 作製法の基本工程 …… 104
  - 2.2 NSL 法で作製された銀 SRR …… 106
- 3. 金属 SRR からなるメタサーフェスの作製 …… 106
  - 3.1 ランダム配置金属 SRR からなるメタサーフェスの作製 …… 106
  - 3.2 六方格子配列金属 SRR からなるメタサーフェスの作製 …… 109
- 4. 厚みのある光メタマテリアルの作製 …… 111
  - 4.1 積層型光メタマテリアルの作製 …… 111
  - 4.2 鋳型成形光メタマテリアルの作製 …… 113
- 5. おわりに …… 114

## 第7節 ランダム分散微粒子を用いるメタマテリアル

- 1. はじめに …… 117
- 2. ランダムメタマテリアル、メタサーフェスの動作原理 …… 117
- 3. 銀ナノディスク単層ランダム分散フィルム …… 120
  - 3.1 銀ナノ石畳 (NASIP) …… 120
  - 3.2 NASIP の原理—設計の基本的な考え方— …… 120
  - 3.3 FDTD 法を用いた設計 …… 121
  - 3.4 近接場光相互作用の重要性 …… 122
  - 3.5 NASIP の設計 …… 123
  - 3.6 NASIP の作製 …… 126
- 4. ランダム分散メタマテリアルの今後 …… 126

## 第3章 | メタマテリアル、メタサーフェスの応用

### 第1節 メタマテリアル、メタサーフェスを用いた可変・変調デバイスへの応用

1. はじめに …… 129
2. メタマテリアルの動的光制御方法 …… 129
  - 2.1 物質の屈折率変化に基づく動的メタマテリアル …… 129
  - 2.2 構造変形に基づく動的メタマテリアル …… 130
3. MEMS 駆動メタマテリアル事例 …… 131
4. おわりに …… 134

### 第2節 メタサーフェスの位相子・波長板応用

1. はじめに …… 137
2. ナノフィン型導波路構造の光学応答 …… 138
3. ナノフィン型位相子・波長板 …… 139
  - 3.1 エアギャップ型ナノフィン位相子・波長板 …… 139
  - 3.2 埋め込み型ナノフィン位相子・波長板 …… 141
4. 疑似ラジアル偏光子への応用 …… 142
5. おわりに …… 144

### 第3節 メタサーフェスにおける局所電場増強現象を利用したマイクロプラズマの生成とその電磁波制御への展開

1. はじめに …… 147
2. 電気回路モデルを用いたメタサーフェスの設計 …… 148
  - 2.1 ローレンツモデルと共振型メタサーフェスの応答 …… 148
  - 2.2 EIT の電気回路モデル …… 150
  - 2.3 放射モードを介して結合した共振器の電気回路モデル …… 151
  - 2.4 放射モードを介して結合した共振器で構成されるメタサーフェス …… 152
3. メタサーフェスの作製と線形特性の評価 …… 152
4. メタサーフェスにおけるプラズマ生成とそれを利用した電磁波制御 …… 154
  - 4.1 メタサーフェスにおける電場増強を利用したプラズマ生成 …… 154
  - 4.2 マイクロプラズマの生成によるメタサーフェスの電磁応答の変化 …… 157
5. おわりに …… 158

### 第4節 メタサーフェスのアンテナ・電波伝搬への応用

1. はじめに …… 161

- 1.1 メタサーフェスとは …… 161
- 1.2 MTS の基本構造 …… 161
- 1.3 MTS の反射特性と帯域特性 …… 162
- 1.4 MTS で実現できる特性と適用領域 …… 162
2. 周波数選択板 (FSS) を用いた MTS からの反射波 …… 164
  - 2.1 空間フィルタとしての FSS …… 164
  - 2.2 等価回路を用いた MTS の反射位相 …… 165
  - 2.3 光学近似理論を用いた MTS からの反射位相 …… 166
3. MTS を用いた特異な反射板の最適設計 …… 168
  - 3.1 人工磁気導体 (AMC) の低姿勢設計 …… 168
  - 3.2 完全磁気導体特性を有する MTS の設計 …… 170
  - 3.3 偏波変換の可能な MTS の設計 …… 171
  - 3.4 反射角制御の可能な MTS の設計 …… 173
  - 3.5 電波吸収特性を有する MTS の設計 …… 174
4. 特異な反射板のアンテナ・電波伝搬への適用 …… 175
  - 4.1 MTS 反射板上に置かれたアンテナ …… 175
  - 4.2 MTS 反射板を用いた平面反射鏡アンテナ …… 175
  - 4.3 MTS 反射板を用いたモノスタティック RCS 低減 …… 177
  - 4.4 MTS 反射板を用いた電波伝搬環境改善 …… 177
  - 4.5 MTS に関する最新の技術研究動向と期待 …… 178

## 第 5 節 メタサーフェスの熱輻射制御への応用

1. はじめに …… 181
2. メタサーフェスによる熱輻射制御の原理 …… 182
3. メタサーフェスによる熱輻射制御 …… 183
  - 3.1 熱輻射制御に用いられるさまざまな構造 …… 183
  - 3.2 金属の溝の 1 次元配列構造 …… 184
  - 3.3 金属の孔や突起の 2 次元配列構造 …… 186
  - 3.4 MIM 積層共振器の 1 または 2 次元配列構造 …… 186
  - 3.5 フォトニック結晶 …… 187
4. メタサーフェスによる熱輻射制御の応用 …… 188
  - 4.1 CO<sub>2</sub> 濃度計測 …… 188
  - 4.2 熱光起電力発電 …… 190
5. おわりに …… 191

## 第6節 メタマテリアル光電変換素子

1. はじめに …… 195
2. プラズモニック・メタマテリアル太陽電池 …… 195
  - 2.1 プラズモニック太陽電池 …… 195
  - 2.2 完全吸収メタマテリアル太陽電池 …… 197
3. おわりに …… 200

SAMPLE

---

# 第1章 メタマテリアル、メタサーフェスの原理・特徴

大阪大学 高原 淳一

---

## 1. はじめに

19世紀初頭にFaradayは静電気力の遠隔作用（クーロンの法則）による説明に納得できず、場を導入して力の伝達に近接作用を復活させた<sup>1)</sup>。そしてMaxwellによってそれまで別の現象と考えられていた電場と磁場が統合され電磁場（electromagnetic field）となる。Feynmanは「1万年後の世界から眺めたら、19世紀の一番顕著な事件がMaxwellによる電磁気法則の発見であったと判断されることはほとんど間違いない」と述べている<sup>2)</sup>。それ以来人類は今日まで、マクスウェル方程式によって電磁場を操るすべを開拓してきた。1990年代以降はナノテクノロジーの目覚ましい発達によりフォトニック結晶やプラズモニクスなどのナノ構造フォトニクスが開拓され、電磁場をナノ構造の誘電体の中や金属の表面に強く閉じ込めて、自在に制御できるようになった。

21世紀になろうとする2000年前後にナノ構造による電磁場の制御に革新がおきた。Smithらが人工的な電磁媒質を作製し、自然には存在しない負の屈折率を持つ人工物質を実現したのである<sup>3)4)</sup>。この構造はメタマテリアルと名付けられ、当初はマイクロ波工学の分野で注目されたものが、急速に動作波長が短波長化され、2000年代を通じてフォトニクス分野においても大きなトレンドとなってゆく。メタマテリアルは負の屈折率物質にとどまらず、完全レンズ、クローキング、ハイパボリック・メタマテリアル、座標変換光学など新しいアイデアが次々に提案され、研究者数も大きく増加した。近年ではメタマテリアルは電磁波だけでなく、分野を超えて音波（音響メタマテリアル）などさまざまな分野に拡がっている<sup>5)6)</sup>。

メタマテリアルはもともと自然界にはない屈折率を持つまったく新しい「バルク」材料として誕生した。ところが、近年では平面型メタマテリアルがメタサーフェス（メタ表面）と呼ばれるようになり発展をとげている<sup>7-11)</sup>。メタサーフェスは波長より極めて薄い構造をとり、作製も3次元的なメタマテリアルと比べてはるかに容易である。このため応用に欠かせない大面積化や曲面への実装にも対応できる。また、機能面でも既存の光学素子にはない多様な光学機能が出せる。さらに、メタサーフェスは輻射や吸収の制御などにも応用され、フォトニクスの広い分野で革新をもたらす基盤技術として、その応用が期待されている。

本稿では電磁波のメタマテリアル、メタサーフェスを理解するうえで必要となる基本的な原理とその応用について網羅的に述べる。ここではフォトニクスの立場から共振型メタマテリアルを

第1章 メタマテリアル、メタサーフェスの原理・特徴

扱う。メタマテリアルとメタサーフェスの設計原理は異なるので、その違いを明確化した。具体的な計算方法や作製方法などは、後に続く各章に譲る。また、参考文献が膨大なため最新のレビュー論文の引用に努め、初学者が最新の論文を容易に入手できるよう配慮した。

## 2. メタマテリアル

### 2.1 メタマテリアルとは

メタマテリアル (metamaterial) は電磁波 (光) の真空波長 ( $\lambda_0$ ) より十分小さなメタ原子 (meta-atom) と呼ばれる人工的な光共振器を多数配列したものである (図1)。これによりまったく新しい電磁応答を示す媒質の実現を目指している。メタ原子を平面基板上に並べて2次元化したものをメタサーフェス (metasurface) またはメタ表面と呼ぶ。メタマテリアルはフォトニック結晶と異なり周期性を必要としないので、メタ原子の配列は周期的である必要はなく、ランダムであってもよい。マイクロ波工学の分野ではよく似た構造が人工誘電体 (artificial dielectric) と呼ばれ 1940 年代後半から研究されていた<sup>6)</sup>。メタマテリアルはもともと「複合材料 (コンポジット) の限界を超えた物質」という意味で材料科学の分野で提案された言葉であったが、これが人工誘電体に転用されたものである。なぜこれがメタマテリアルと名付けられたのかも含めて、メタマテリアル誕生の詳細な経緯は文献に詳しい<sup>12)</sup>。メタマテリアルには上記のように共振

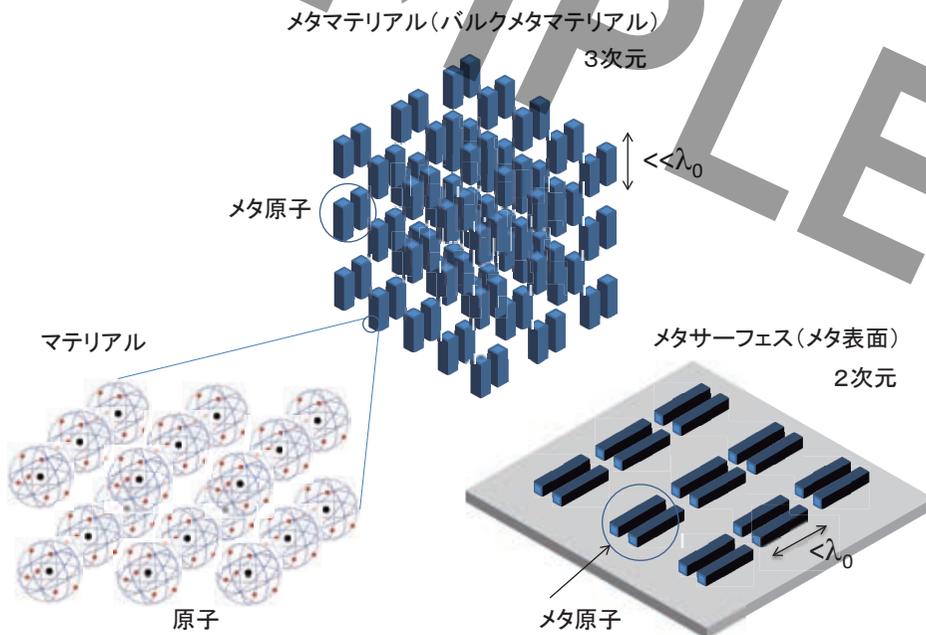


図1 メタマテリアルのコンセプト

メタ原子から構成される有効媒質としてのバルクメタマテリアル。メタ原子を一層のみ並べるとメタサーフェスとなる。

器を多数並べた共振型メタマテリアルの他にも、伝送線路理論に基づいた非共振型メタマテリアルがある。非共振型メタマテリアルはマイクロ波域で実現されているが、本稿では述べないので文献を参照されたい<sup>6),13)</sup>。

もともとメタはギリシア語 ( $\mu$   $\epsilon$   $\tau$   $\acute{\alpha}$ ) で「後、背後」を意味し、メタル (metal) のメタではない。これは哲学の形而上学 (metaphysics) やメタ数学 (metamathematics) などの使用例がよく知られている。例えば、メタ数学は数学自体を研究する通常の数学の枠を超えた数学である。メタ原子それ自体は原子 (atom) が配列した物質 (material) からできているので、メタマテリアルにはマテリアル自体からできた通常のマテリアルを超えたマテリアルという自己言及の意味が含まれる。現在ではメタマテリアルをそれほど厳密に定義せず、広くとらえるようになってきているが、もともと「マテリアルの持つ自然の特性を超えるマテリアル」という壮大な意味があることは心にとめておきたいものである。

## 2.2 有効媒質

メタマテリアルはメタ原子の構造のスケールで電磁波 (光) の場を平均化した有効媒質 (effective medium) である。メタ原子のサイズが  $\lambda_0$  より十分小さい場合に、微細な構造を粗視化することで、メタ原子の集団を有効屈折率 (effective refractive index)  $n_{\text{eff}}$  を持つ均一な媒質 (homogeneous medium) とみなすことができる。これを有効媒質近似 (Effective Medium Approximation; EMA) と呼ぶ。もともと我々が大学で習う電磁気学では、物質中の電場や磁場は原子スケールで平均化された巨視的なものとして扱われる。そこでは原子の種類と配置によって電磁波に対する物質の巨視的な応答として分極ができ、屈折率が決まる。メタマテリアルでもこれと同様に、メタ原子の構造と配置により電磁波に対する分極応答が生じ、平均化された屈折率である  $n_{\text{eff}}$  が決まる。この問題は誘電体中に別の粒子を混ぜるとき、平均屈折率を求めるために長い研究の歴史があり、有効媒質近似はこのような系の屈折率を各種の混合則により定量的に求めるための理論である<sup>14)</sup>。

ここで、以下の議論で使用する用語を整理しておこう。メタ原子が2層以上積層されたメタマテリアルを3次元メタマテリアル、また積層数が多く波長以上の厚さを持つものをバルクメタマテリアルと呼ぶ。メタ原子が1層のみのメタマテリアルをメタサーフェスと呼ぶ。3次元メタマテリアルでマクロに均一な媒質とみなせるものを等方性メタマテリアル、等方的でないものを異方性メタマテリアルと呼ぶ。メタマテリアルのほとんどは異方性である。

## 2.3 $\epsilon$ - $\mu$ ダイアグラム

メタ原子の構造により  $n_{\text{eff}}$  を制御し、負屈折率物質 (Negative Index Material; NIM) さえも実現できることがメタマテリアルの特徴である。さらにメタマテリアルは NIM だけにとどまらず、さまざまな  $n_{\text{eff}}$  の値を実現できる自由度の高さを持つので、それを俯瞰してみよう。

一般に物質の屈折率  $n$  と誘電率  $\epsilon$ 、透磁率  $\mu$  の間には以下の関係式がある。