

メタマテリアルアンテナの基礎

工学博士 宇野 亨
博士(工学) 道下 尚文 【共著】

コロナ社

まえがき

電磁気学で学んだように、物質（マテリアル）の誘電率や透磁率とは、物質を構成する原子や分子の電気分極と磁気分極に起因し、それらを巨視的な意味で平均した電磁特性である。また、それらの値は分極の大きさや並び方に依存する。一方、帯電した導体やループ状の電流は十分遠い場所から観測すると、等価的に誘電体や磁性体のように振舞う。したがって、適当な大きさの材料を配列することによって材料自体には備わっていない新しい電気的性質を持たせることが可能であり、その性質は材料自体の形や並べ方を工夫することによって変えることができる。このような人工構造体をメタマテリアルと呼び、その構成要素を物質の例にならってメタ原子、あるいはユニットセルという。一方、書名のメタマテリアルアンテナとはアンテナの名称ではなく、メタマテリアルを用いた、あるいはその特性を利用したアンテナという意味である。前者はアンテナ自体にメタマテリアル構造が組み込まれたアンテナのことで、本書では「メタマテリアルベースアンテナ」と呼ぶ。後者のメタマテリアルアンテナとは、アンテナ自体には特別な工夫はされていないものの、周囲にメタマテリアルがあるために相互結合して、全体システムとして特徴的な振る舞いをするアンテナのことであり、「メタマテリアル融合アンテナ」と呼ぶことにする。

メタマテリアルの工学的応用に関する研究は、特にマイクロ波デバイスやアンテナなどの分野で急速に進みつつある。このような背景から、電子情報通信学会アンテナ・伝播研究専門委員会において、著者の一人を講師とするメタマテリアルのアンテナおよび関連分野への応用に関するワークショップが開催された。本書はワークショップのテキストを整理し、いくつかの話題を追加したもので、メタマテリアルの特徴を理解するとともに、初心者でもメタマテリアルアンテナの設計ができるようになることを目的に書かれている。このため、

いたずらに専門的になりすぎないように注意しながら、電磁気学を一通り修了した学部学生や若手の技術者でも容易に理解できるように工夫している。1章と2章はメタマテリアルアンテナを理解するうえで必要不可欠な電磁界の性質やアンテナの基礎、およびメタマテリアル構造の紹介とその基本的な考え方を述べている。したがって、これらに十分習熟している読者も復習を兼ねて一読をお願いしたい。3章からはメタマテリアルアンテナの設計法とその実用例を紹介しているが、3章はその最も基本的な考え方を述べており、本書を理解するうえで欠かせない章である。4章はメタマテリアル構造が組み込まれたメタマテリアルベースアンテナの設計法を詳細に述べている。5章は平面構造のメタマテリアルであるメタサーフェスとその応用例を紹介している。メタマテリアルの一形態ではあるが平面構造特有の原理と特徴があることから、章を改めることにした。一方、電磁波との類似性から光や音響、あるいは熱の分野でもメタマテリアルが考えられるが、本書ではそれらには触れず、もっぱらコヒーレントなマイクロ波帯のメタマテリアルアンテナだけを取り扱う。

メタマテリアルアンテナの設計には、自作あるいは市販電磁界シミュレータの使用が不可欠である。しかしながら、読者の置かれている環境はさまざまであろうし、シミュレータだけに頼っているのは、結局本質を見失ってしまうことも少なくない。そのため、簡単なコメントは加えたものの大きく取り上げるのは適当でないと判断した。この分野の専門書や学术论文などで補っていただきたい。

最後に、本書はいろいろな方々からのご協力、ご支援によって完成させることができた。有益なご助言をいただいた電子情報通信学会アンテナ・伝播研究専門委員の皆さん、研究室の学生諸君に感謝する。また、出版に際し、著者らのわがままなお願いを聞いてくださったコロナ社の皆さんには大変お世話になった。ここに記して深く謝意を表する。

2021年7月

宇野 亨・道下 尚文

目 次

1 章	メタマテリアルとアンテナ	1
1.1	物質の巨視的電磁特性とメタマテリアル	1
1.1.1	構成方程式	1
1.1.2	メタマテリアル	4
1.2	メタマテリアル素材とその特性	7
1.2.1	実効誘電率・実効透磁率と等価回路	7
1.2.2	細線導体とスプリットリング共振器	10
1.2.3	格子構造体	16
1.2.4	誘電体共振器アレー	19
1.2.5	セラミックコンデンサ	21
1.2.6	電磁界解析とメタアトム	22
1.3	アンテナと基本定数	25
1.3.1	入力インピーダンス	25
1.3.2	指向性	27
1.3.3	利得	27
1.3.4	受信アンテナ	28
1.3.5	アンテナの回路論的取り扱い	28
1.4	メタマテリアルのアンテナ応用	35
1.4.1	レンズアンテナ	35
1.4.2	小形アンテナの限界	37

2章 電磁界およびアンテナの基礎 39

2.1 基本電磁法則	39
2.1.1 マクスウェルの方程式	39
2.1.2 境界条件	43
2.1.3 エネルギー保存則とポインティングベクトル	45
2.1.4 波動方程式と放射条件	48
2.1.5 電磁ポテンシャル	50
2.1.6 電磁界の双対性	54
2.1.7 相反定理	55
2.1.8 相似の理	57
2.2 平面波	58
2.2.1 平面波の伝搬	58
2.2.2 偏波	64
2.2.3 平面波の反射と屈折	67
2.2.4 位相速度と群速度	76
2.3 表面波	79
2.3.1 境界に捕捉された表面波と漏れ波	81
2.3.2 ツェーネック波と表面プラズモンポラリトン	82
2.4 左手系媒質	83
2.4.1 ポインティングベクトル	84
2.4.2 分散性媒質のエントロピー条件	85
2.4.3 平板レンズ	88
2.4.4 漏れ波アンテナ	89
2.5 電磁波の放射と散乱	90
2.5.1 波動方程式の解	90
2.5.2 波動方程式の解表現と等価定理	93
2.5.3 遠方界	97
2.5.4 散乱と断面積	100
2.6 アンテナの基本特性	103

2.6.1	微小ダイポールアンテナ	103
2.6.2	微小ループアンテナ	106
2.6.3	アンテナのインピーダンス	107
2.6.4	指向性と指向性利得	110
2.6.5	アンテナの利得	112
2.6.6	放射効率	113
2.7	基本アンテナ	114
2.7.1	ダイポールアンテナ	114
2.7.2	モノポールアンテナ	119
2.7.3	ループアンテナ	120
2.7.4	マイクロストリップアンテナ	121
2.7.5	進行波形アンテナ	123

3章 CRLH伝送線路 126

3.1	右手系伝送線路	126
3.1.1	伝送線路の種類とその特徴	126
3.1.2	TEM 線路の電磁界と伝送線路方程式	128
3.1.3	回路論的伝送線路方程式	132
3.1.4	伝送線路と平面波のアナロジー	134
3.1.5	無損失伝送線路と基本定数	135
3.2	CRLH伝送線路	140
3.2.1	理想左手系伝送線路	140
3.2.2	右手左手系複合伝送線路	141
3.2.3	バランス型 CRLH 伝送線路	146
3.3	CRLH 伝送線路と 1 次元メタマテリアル	148
3.3.1	周期回路網の分散関係式	150
3.3.2	T 形 CRLH 等価回路	152
3.4	左手系素子の実装とその特性解析	155
3.4.1	回路素子の実装	155
3.4.2	回路パラメータの抽出	159

3.5	CRLH 伝送線路の設計	163
3.5.1	準回路理論的設計	163
3.5.2	準電磁界理論的設計	163
3.5.3	設計フローチャート	166
3.6	2次元 CRLH 伝送線路	167
3.6.1	分散関係式	167
3.6.2	ブリルアンゾーンと分散特性	171
3.6.3	マッシュルーム構造の分散特性	174
4章 メタマテリアルベースアンテナの設計		176
4.1	分散特性とアンテナ	176
4.2	アンテナの小形化とその設計事例	179
4.2.1	基本設計法	180
4.2.2	同軸モノポールアンテナ	181
4.2.3	平行2線型ダイポールアンテナ	184
4.2.4	マイクロストリップアンテナ	186
4.3	偏波制御とその設計事例	188
4.3.1	ループアンテナ	188
4.3.2	スパイラルアンテナ	190
4.4	ビーム走査と漏れ波アンテナの設計事例	192
4.4.1	漏れ波と右手・左手系放射	193
4.4.2	基本設計法	194
4.4.3	導波管スロットアレー漏れ波アンテナ	195
4.4.4	マイクロストリップ型漏れ波アンテナ	196
4.4.5	はしご型漏れ波アンテナ	200
4.4.6	マッシュルーム型漏れ波アンテナ	203
4.4.7	コプレーナストリップ漏れ波アンテナ	207

5章 メタサーフェス 209

5.1 周波数選択板	209
5.1.1 動作原理	210
5.1.2 設計手順	212
5.2 自己補対メタサーフェス	215
5.3 リフレクトアレー	216
5.4 クローキング	220
5.4.1 リフレクトアレーによるイリュージョンクローキング	221
5.4.2 変換電磁気学	222
5.5 電波吸収板	226
5.5.1 FSS型ソールズベリ－電波吸収体	226
5.5.2 マッシュルーム型電波吸収体	228
5.6 メタレドーム	229
5.7 人工磁気導体	232
5.7.1 AMCの実現例と設計法	233
5.7.2 アンテナの低姿勢化	239
5.8 メタサーフェス融合アンテナ	241
5.8.1 EBG特性を利用した表面波の低減	241
5.8.2 マイクロストリップアンテナの高利得化	242
5.8.3 アンテナ相互結合の低減	245
5.9 メタサーフェスの設計	246

付録 A 物理定数と物質の電気定数 249

A.1 基本定数	249
A.2 物質の電気定数	250

付録 B 導体ストリップと細線導体 252

B.1 無限長ストリップ導体の静電容量	252
B.1.1 無限長導体スリットの静電ポテンシャル	252
B.1.2 ストリップ導体間の静電容量	253
B.2 周期細線導体のインダクタンス	254
B.2.1 無限長導体アレー	254
B.2.2 有限長細線導体	256
B.3 マッシュルーム型 EBG	257

付録 C 2 端子対回路網 260

C.1 集中定数回路	260
C.1.1 インピーダンス行列とアドミタンス行列	260
C.1.2 縦続行列	261
C.1.3 行列間の関係	263
C.1.4 等価回路変換	264
C.1.5 散乱行列	264
C.2 分布定数線路	268
C.2.1 Z 行列	268
C.2.2 F 行列	269
C.2.3 S 行列	270

付録 D ベクトル公式 272

D.1 座標系と単位ベクトル	272
D.2 ベクトルの積	273
D.3 微分公式	273

D.4 積 分 公 式	275
D.4.1 体積積分と面積分	275
D.4.2 面積分と線積分	276
D.4.3 グリーンの定理	276

付録E 数 値 積 分 277

引用・参考文献	279
索 引	286

1

メタマテリアルとアンテナ

本章では、メタマテリアルあるいはアンテナを初めて学ぶ読者を対象に、それらの基本的な性質と考え方を説明する。電磁気学と電気回路の初歩的知識だけを前提としてできるだけ簡単な説明を心掛けたが、必要なら2章とあわせて読んでいただきたい。

1.1 物質の巨視的電磁特性とメタマテリアル

1.1.1 構成方程式

電磁気学で学んだように^{1)~3)}、真空中では電束密度 \mathbf{D} [C/m²] は電界 \mathbf{E} [V/m] に、磁束密度 \mathbf{B} [T] は磁界 \mathbf{H} [A/m] にそれぞれ比例し、 $\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E}$ 、 $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$ と表される¹⁾。ここで ϵ_0 [F/m]、 μ_0 [H/m] はそれぞれ真空の誘電率、真空の透磁率である²⁾。これに対して物質内部では、 \mathbf{D} も \mathbf{B} も一般に \mathbf{E} と \mathbf{H} の関数となり、それぞれを \mathbf{F}_D 、 \mathbf{F}_B とすると

$$\mathbf{D} = \mathbf{F}_D(\mathbf{E}, \mathbf{H}), \quad \mathbf{B} = \mathbf{F}_B(\mathbf{E}, \mathbf{H}) \quad (1.1)$$

と表される。この関係を構成関係式、あるいは構成方程式 (constitutive equations) といい³⁾、原理的には物質を構成する電子や分子の運動方程式を解くことによって得られるが、実際には測定によって実験的に決定されることが多い。

¹⁾ 肩付き番号は巻末の引用・参考文献を示す。

²⁾ 具体的な値は付録 A を参照していただきたい。

³⁾ \mathbf{E} と \mathbf{B} が基本的な場で、 \mathbf{D} と \mathbf{H} が物質の存在によって現れる補助的な場であるとしたほうが合理的である²⁾。しかし、アンテナやマイクロ波の分野では電界 \mathbf{E} と磁界 \mathbf{H} を中心に議論することが多いことから、本書では式 (1.1) のように表すこととした。

一方、導電性媒質内の電子は、熱振動するイオンや不純物原子と衝突して、減速と加速を繰り返しながら全体として電界と反対向きに移動する。この運動を巨視的に正の電荷の流れとして捉えたものが導電電流である。電流が流れると磁界が発生し、運動する電荷にローレンツ力がはたらく。したがって、電流密度 \mathbf{J}_e [A/m²] も \mathbf{E} と \mathbf{H} の関数となり

$$\mathbf{J}_e = \mathbf{F}_e(\mathbf{E}, \mathbf{H}) \quad (1.2)$$

と表される。以下に代表的な物質の構成方程式とその特徴を示す。

〔1〕 等方性媒質 物質の電氣的・磁氣的性質が方向によらないとき、その物質を等方性媒質 (isotropic medium) という。線形・等方性媒質に対する構成方程式は

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}, \quad \mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (1.3)$$

$$\mathbf{J}_e = \sigma_e \mathbf{E} + \mathbf{J}_e^{ex} \quad (1.4)$$

で与えられる。ここで ε , μ をそれぞれ誘電率 (permittivity), 透磁率 (permeability), σ_e [S/m] を導電率 (electric conductivity) あるいは電気伝導率といい、これらの値が一定値をとる媒質を均質媒質 (homogeneous medium) あるいは一様媒質、場所によって変化する物質を不均質媒質 (inhomogeneous medium) という。なお、式 (1.4) はオームの法則そのもので、 \mathbf{J}_e^{ex} は外部から強制的に印加された電流密度である。

式 (1.3), (1.4) は、電磁界の強度と時間的変化が極端に大きくなければ、身近にある多くの物質に対して成立する。工学的に重要と思われる物質の電気定数を付録 A に載せたので、参考にしていただきたい。なお、 \mathbf{J}_e^{ex} のような電磁界の源が存在しない均質領域を自由空間 (free space) という。 $\varepsilon = \varepsilon_0$, $\mu = \mu_0$, $\sigma_e = 0$ の真空と混同しがちなので注意していただきたい。

〔2〕 異方性媒質 物質の電氣的性質あるいは磁氣的性質が方向によって異なるとき、その物質を異方性媒質 (anisotropic medium) という。プラズマや液晶などがその代表例である。異方性媒質に対する構成方程式は、誘電率テンソルを $\bar{\varepsilon}$, 透磁率テンソルを $\bar{\mu}$ としたとき

$$\mathbf{D} = \bar{\bar{\epsilon}}\mathbf{E}, \quad \mathbf{B} = \bar{\bar{\mu}}\mathbf{H} \quad (1.5)$$

と表される。これは電気分極ベクトル \mathbf{P} が電界と異なった方向を向いていることを意味している。磁化ベクトル \mathbf{M} も同様に磁界 \mathbf{H} と異なる方向を向く。 $\mathbf{D} = \bar{\bar{\epsilon}}\mathbf{E}$ を直角座標で表すと

$$\begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} & \epsilon_{zy} & \epsilon_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

となる。ただし ϵ_{ij} ($i, j = x, y, z$) は誘電率テンソル $\bar{\bar{\epsilon}}$ の要素であり、一般には場所や周波数の関数となる。

〔3〕 分散性媒質 時刻 t における電束密度、磁束密度がその時刻の電磁界だけではなく、過去の値にも依存するとき、その物質を分散性媒質 (dispersive medium) という。分散性媒質に対する構成方程式の最も簡単なものは

$$\begin{cases} \mathbf{D}(\mathbf{r}, t) = \int_{-\infty}^t \epsilon(\mathbf{r}, \tau) \mathbf{E}(\mathbf{r}, t - \tau) d\tau \\ \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \int_{-\infty}^t \mu(\mathbf{r}, \tau) \mathbf{H}(\mathbf{r}, t - \tau) d\tau \end{cases} \quad (1.7)$$

のように畳込み積分で表される。ここで \mathbf{r} は位置ベクトルである。式 (1.7) を時間に関してフーリエ変換し、その周波数スペクトルを $\dot{\mathbf{D}}$ などとベクトル \mathbf{D} の上にドット「 $\dot{}$ 」を付けて表すと

$$\dot{\mathbf{D}}(\mathbf{r}, \omega) = \epsilon(\mathbf{r}, \omega) \dot{\mathbf{E}}(\mathbf{r}, \omega), \quad \dot{\mathbf{B}}(\mathbf{r}, \omega) = \mu(\mathbf{r}, \omega) \dot{\mathbf{H}}(\mathbf{r}, \omega) \quad (1.8)$$

を得る。このように、周波数領域の複素電磁界に対する構成方程式は、等方性媒質に対する関係式 (1.3) と同じになる。ただし誘電率 ϵ 、透磁率 μ は一般に周波数の関数となるため、式 (1.7) で表される媒質を周波数分散性媒質という。実際のほとんどの物質は少なからず周波数分散特性を持つと考えてよい。また、式 (1.8) の ϵ 、 μ は一般に複素数となるため、それぞれ複素誘電率 (complex permittivity)、複素透磁率 (complex permeability) と呼ばれる。

〔4〕 双異方性媒質・双等方性媒質 物質内では、電束密度は電界のみに依存し、磁束密度は磁界のみに依存するのが一般的であるが、電界と磁界の両方に関係する媒質もある。この中で

$$\mathbf{D} = \bar{\bar{\epsilon}}\mathbf{E} + \bar{\xi}\mathbf{H}, \quad \mathbf{B} = \bar{\bar{\mu}}\mathbf{H} + \bar{\zeta}\mathbf{E} \quad (1.9)$$

のように表される物質を双異方性媒質 (bi-anisotropic medium) といい、 $\bar{\bar{\epsilon}}$ や $\bar{\xi}$ がテンソル量ではなくスカラー量であるとき、双等方性媒質 (bi-isotropic medium) という⁴⁾。

〔5〕 非線形媒質 電磁界の強度が小さければ、電界、磁界と電束密度、磁束密度は多くの媒質で線形の関係で結ばれる。しかし、電磁界の強度が大きくなると物質との相互作用も大きくなるため、構成方程式は電磁界の複雑な関数となる。身近なものは強誘電体や強磁性体におけるヒステリシス現象である。また、光の周波数でもいろいろな非線形効果が知られている⁵⁾。このような媒質を総称して非線形媒質 (nonlinear medium) という。

〔6〕 ランダム媒質 誘電率や透磁率が、場所や時間に関してランダムに変化するような媒質をランダム媒質 (random medium) という。電磁界もまたランダムに変化するため、マクスウェルの方程式を決定論的に解くということはあまり意味を持たず、電磁界の統計的な性質を知ることが重要となる⁶⁾。

1.1.2 メタマテリアル

複素比誘電率を $\epsilon_r = \epsilon'_r - j\epsilon''_r$ 、複素比透磁率を $\mu_r = \mu'_r - j\mu''_r$ と表したとき、虚数部はジュール損やヒステリシス損などの損失に対応するから必ず $\epsilon''_r \geq 0$ 、 $\mu''_r \geq 0$ となる[†]。これらの値は温度や周波数によって変化するが、付録 A に示すような多くの身近な材料では $\epsilon'_r \geq 1$ 、 $\mu'_r > 0$ となる。これに対して、例えば電離気体では、プラズマ周波数以下の周波数帯で $\epsilon'_r < 0$ 、 $\mu'_r \approx 1$ となる。シリコンは約 300 nm 以上の波長帯で $\epsilon'_r \geq 0$ となるが、それ以下の波長では $\epsilon'_r < 0$ となる。ただし、この波長領域で ϵ''_r は非常に大きい値となる。一方、超電導の

[†] 2.1.3 項と 2.4.2 項を参照されたい。また、文献 7)、8) などともあわせて参照されたい。

ような反磁性体の比透磁率は $\mu'_r < 0$ である。また、パーマロイ（鉄・ニッケル合金）やガーネット（ざくろ石）の中の特殊な化合物は、マイクロ波帯の周波数で $\mu'_r < 0$ となることが知られている。このように誘電率も透磁率もその実数部は負の値をとりうるが、 ϵ'_r と μ'_r が同時に負になるような物質は知られていない。

このことを図 1.1 の ϵ - μ ダイアグラムで表すと、現在までによく知られた物質の媒質定数はすべて第 I 象限、第 II 象限および第 IV 象限のいずれかに属し、第 III 象限に属するような物質は、原子・分子の分極あるいはそれらの運動という観点からは実在しないということを意味している。

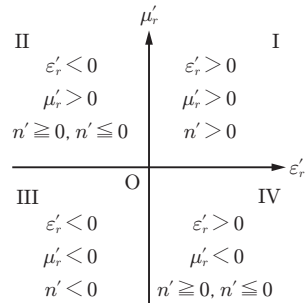


図 1.1 ϵ - μ ダイアグラム

これに対して Veselago は、第 III 象限に属する無損失媒質、すなわち誘電率と透磁率が同時に負になる媒質があったとしたら、どのような電波伝搬現象が起こるかを理論的に検討した⁹⁾。これがメタマテリアル研究のきっかけとなったが¹⁰⁾、このような媒質が図 1.2 (a) のような周期的に配列された細い導体円柱¹¹⁾ と図(b)の 2 重スプリットリング共振器 (split-ring resonator : SRR)¹²⁾ の組合せによって等価的に実現できることがわかったのは、30 年以上経ってからのことである¹³⁾。ただし、等方性ではなく電界は導体円柱に平行、磁界はリングに垂直でなければならない。なお、周期構造の一つ一つをユニットセ

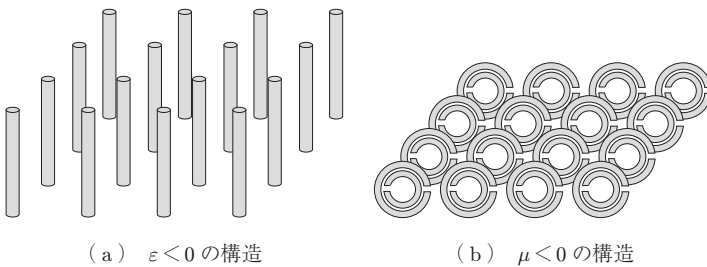


図 1.2 周期細線導体と周期スプリットリング

索引

【あ】
アドミタンス行列 261

【い】
位相速度 76
位相定数 63, 81, 124
遺伝的アルゴリズム 220
インダクタ
 スタブ—— 158
 メアンダライン—— 158
インターディジタル
 キャパシタ 157
インピーダンス
 ——行列 260
 固有—— 63
 自己—— 260
 相互—— 260
 入力—— 25, 108, 116
 波動—— 63
 放射—— 108

【う】
右旋偏波 see 右回り偏波

【え】
エアライン see ライトライン
エネルギー保存則 46
エバネッセント波 74
エンドファイア 89, 124
エントロピー
 ——条件 87
 ——の法則 48, 87
遠方領域 99

【か】
ガウス・ルジャンドル則 277
可逆定理 see 相反定理
重ね合せの原理 42, 49
完全磁気導体 44
完全整合層 166
完全導体 44

【き】
起電力法 116
基本行列 see 縦続行列
逆格子 171
境界条件 43
近傍領域 99

【く】
グース・ヘンシェン効果 80
屈折率 60, 77, 83
クラマース・クローニッチ
 の関係式 88
グリーン関数
 スカラー—— 91
 ダイヤディスク—— 93
クローキング 220
 イリュージョン—— 220
 カーペット—— 220
群速度 78

【け】
減衰定数 63, 81

【こ】
構成方程式 1

【さ】
サイドローブ 111
左旋偏波 see 左回り偏波
散乱
 ——行列 265
 後方—— 101
 ——振幅 101
 前方—— 102
散乱断面積 101
 後方—— 101
 全—— 102
 微分—— 101

【し】
シュルクノフスプリット
 リング 13
磁気伝導率 40
軸比 67
指向性 27, 110
 ——利得 111
 ——関数 110
 単(一)—— 110
実効充填率 34
自由空間 2
縦続行列 261
周波数選択板 209
主ビーム 111
主ローブ see 主ビーム
準静電界 105
磁流 39
人工磁気導体 233

【す】
スネルの法則 68

スパイラルアンテナ 190
 スーパーセル 218
 スプリットリング共振器 5
 スロットアレーアンテナ 195

【せ】

積層セラミックコンデンサ
 21
 前後比 111
 全反射 74, 80
 —臨界角 74
 全方向性 110

【そ】

相似の理 57
 双対性 55, 107
 相反定理 55, 110
 速波 79, 82, 123
 ソールズベリースクリーン
 電波吸収体 226
 損失係数 35

【た】

ダイポールアンテナ
 29, 114, 184
 微小— 104
 断面積
 吸収— 102
 全— 103
 バイスタティック
 レーダ— 101, 219
 レーダ— 102

【ち】

遅波 79, 81, 123

【つ】

ツェーネック波 83

【て】

ディエンベディング 160
 ディラックコーン 174
 電気伝導率 see 導電率

伝送行列 see 縦続行列
 伝搬定数 63
 電離気体 11, 77
 電力
 入射—
 26, 113, 114, 266

入力— 26, 113, 114
 反射— 26, 266
 放射— 98, 113

【と】

等価定理 96
 透磁率 2, 250
 複素— 3, 42, 59
 導電率 2, 250
 等方性 110

【な】

ナル see ヌル

【に】

入射
 —電力 26, 113, 114, 266
 —波 265
 —面 68
 入力
 —インピーダンス
 25, 108, 116
 —電力 26, 113, 114

【ぬ】

ヌル 111

【は】

媒質
 異方性— 2
 均質— 2
 双異方性— 4
 双等方性— 4
 導電性— 43, 45, 48
 等方性— 2
 非線形— 4
 左手系— 84

非分散性— 76
 不均質— 2
 分散性— 3, 77
 右手系— 84
 ランダム— 4
 波数 61, 89
 —ベクトル 62, 68, 80

波束 77
 パターン

電界— 110
 電力— 110
 放射— 110
 E面放射— 110
 H面放射— 110
 パッチ 32, 121, 155

波動方程式
 スカラー— 52, 90
 ベクトル— 49, 52

バビネの定理 210
 反射
 —電力 26, 266
 —波 265

ハンセン・ウッドヤード
 の条件 124
 半値角 111
 半値幅 see 半値角

【ひ】

非伝搬波
see エバネッセント波
 表皮の深さ 16
 表面波 79, 241
 —アンテナ 124
 表面プラズモン 83
 表面プラズモンポラリトン 83

【ふ】

フォスタのリアクタンス
 定理 8
 副ローブ see サイドローブ
 ブリルアンゾーン 172
 フリンジング効果 33

ブルースター角	73, 82	ポインティングベクトル	46	非固有——	82
準——	74	複素——	47, 63	【ゆ】	
フレネル		放射		誘電率	2, 250
——透過係数	70, 71	——インピーダンス	108	複素——	3, 42, 59
——反射係数	70, 71	——界	105	誘導界	105
——領域	99	——条件	50, 82, 95	ユニタリ	266
フロケの周期境界条件	150	——抵抗	98	ユニットセル	5, 209
プロッホの周期境界条件		——電力	98, 113	【ら】	
<u>see</u> フロケの周期境界条件		ポテンシャル		ライトライン	79
ブロードサイド	89	スカラー——	52, 91	【り】	
分散		ベクトル——	51, 91	利得	27, 112
異常——	78	【ま】		指向性——	111, 112
正常——	79	マイクロストリップ		絶対——	27, 112
——ダイアグラム	79	アンテナ	32, 121, 186	相対——	27, 112
ドゥルーテ型——	9	マクスウエル方程式	39	動作——	113
ローレンツ型——	9	マッシュルーム構造	156	リフレクトアレーアンテナ	
分散曲線		【む】			216
<u>see</u> 分散ダイアグラム		虫明の関係式	215	【る】	
【へ】		【め】		ループアンテナ	31, 188
ヘルツベクトル	54	メタアトム	6, 209	微小——	106
変換電磁気学	223	メタサーフェス	35	【れ】	
偏向角 <u>see</u> ブルースター角		自己補対——	215	零次共振	186
ペンシルビーム	110	メタマテリアルベース		レーダ	101, 229
偏波	64	アンテナ	35	レーダ断面積	102
円——	64	メタマテリアル融合		レドーム	229
だ円——	64	アンテナ	35	メタ——	230
直線——	64	【も】		【ろ】	
左回り——	64	モノポールアンテナ	119, 183	ロッドアンテナ	123
右回り——	64	モーメント法	117	ローレンツの条件	52
【ほ】		漏れ波	82		
ホイゲンズ・フレネルの		——アンテナ	89, 125, 193		
原理	96				

【A】		<u>see</u> 人工磁気導体		Bloch periodic	
admittance matrix	261	attenuation constant	63, 81	boundary condition	
air line	<u>see</u> light line	axial ratio	67	<u>see</u> Floquet periodic	
Artificial Magnetic		【B】		boundary condition	
Conductor (AMC)		Babinet principle	210	boundary conditions	43
				Brewster angle	73, 82

preudo — 74
 Brillouin zone 172
 broadside 89

[C]

chain matrix
see **fundamental matrix**
 Chu の理論限界 (Chu-limit) 37
 Circuit Analog 吸収体
see ソールズベリースクリュー
 ン電波吸収体 (**Salisbury screen absorber**)
 cloaking 220
 carpet — 220
 illusion — 220
 constitutive equations 1
 cross section
 absorption — 102
 bistatic radar — 101, 219
 radar — 102
 total — 103

[D]

de-embedding 160
 dipole antenna 29, 114, 184
 small — 104
 Dirac cone 174
 directive gain 111
 directivity 27, 110
 — function 110
 unidirectional — 110
 dispersion
 — diagram 79
 Drude-type — 9
 extra-ordinary — 78
 Lorentz-type — 9
 ordinary — 79
 duality 55, 107

[E]

electric conductivity 2, 250
 EMF method 117
 endfire 89, 124
 energy conservation law 46
 entropy
 — condition 87
 law of — 48, 87
 equivalence theorem 96
 evanescent wave 74

[F]

F 行列 (F matrix)
see 縦続行列 (**fundamental matrix**)
 far-field region 99
 fast wave 79, 82, 123
 FDTD 法 (FDTD method) 115
 filling factor 34
 Floquet periodic
 boundary condition 150
 Foster's reactance
 theorem 8
 free space 2
 Frequency Selective
 Surface 209

Fresnel
 — reflection coefficient 70, 71
 — region 99
 — transmission
 coefficient 70, 71
 fringing effect 33
 front-to-back ratio 111
 FSS see 周波数選択板
 fundamental matrix 261

[G]

GA see 遺伝的アルゴリズム
 gain 27, 112
 absolute — 27, 112

actual — 113
 directive — 111, 112
 relative — 27, 112
 Gauss-Legendre's rule 277
 Genetic Algorithm 220
 Goos-Hänchen effect 80
 Green's function
 dyadic — 93
 scalar — 91
 group velocity 78

[H]

half-power beam width 111
 Hansen-Woodyard
 condition 124
 Hertz vector 54
 Huygens-Fresnel's
 principle 96

[I]

impedance
 — matrix 260
 input — 25, 108, 116
 intrinsic — 63
 mutual — 260
 radiation — 108
 self — 260
 wave — 63

incident
 — plane 68
 — power 26, 113, 114, 266
 — wave 265
 induction field 105
 inductor
 meander line — 158
 stub — 158

input
 — impedance 25, 108, 116
 — power 26, 113, 114
 interdigital capacitor 157
 isotropic 110

- [K]**
Kramars-Krönig relation 88
- [L]**
leaky wave 82
— antenna 89, 125, 193
improper — 82
light line 79
loop antenna 31, 188
small — 106
Lorentz condition 52
loss tangent 35
- [M]**
magnetic conductivity 40
magnetic current 39
main beam 111
main lobe *see* **main beam**
major lobe *see* **main beam**
Maxwell's equations 39
medium
anisotropic — 2
bi-anisotropic — 4
bi-isotropic — 4
conducting — 43, 45, 48
dispersive — 3, 77
homogeneous — 2
inhomogeneous — 2
isotropic — 2
left-handed — 84
non-dispersive — 76
nonlinear — 4
random — 4
right-handed — 84
meta-atom 6, 209
metamaterial-based
antenna 35
metamaterial-inspired
antenna 35
metasurface 35
self-complementary —
- 215
method of moments 117
microstrip antenna 32, 121, 186
minor lobe *see* **side lobe**
monopole antenna 119, 183
Multilayer ceramic
capacitor 21
Mushiake relationship 215
mushroom structure 156
- [N]**
near-field region 99
null 111
- [O]**
omnidirectional 110
- [P]**
p 偏波 *see* **TM 波**
patch 32, 121, 155
pattern
field — 110
power — 110
radiation — 110
perfect electric conductor 44
pencil beam 110
permeability 2, 250
complex — 3, 42, 59
permittivity 2, 250
complex — 3, 42, 59
phase constant 63, 81, 124
phase velocity 76
plasma 11, 77
perfect magnetic
conductor 44
PML 166
polarization 64
circularly polarized
wave 64
elliptically polarized
wave 64
- left-handed polarized
wave 64
linearly polarized wave 64
right-handed polarized
wave 64
polarizing angle
see **Brewster angle**
potential
scalar — 52, 91
vector — 51, 91
power
incident — 26, 113, 114, 266
input — 26, 113, 114
radiation — 98, 113
reflected — 26, 266
Poynting vector 46
complex — 47, 63
principle of similitude 57
propagation constant 63
- [Q]**
quasi-static field 105
- [R]**
radar 101, 229
radiation
— condition 50, 82, 95
— field 105
— impedance 108
— power 98, 113
— resistance 98
radome 229
meta — 230
RCS 102, 219, 228
realized gain
see **actual gain**
reciprocal lattice 171
reciprocity theorem 55, 110
reflectarray antenna 216
reflected
— power 26, 266

— wave 265
 refractive index 60, 77, 83
 rod antenna 123

【S】

S 行列 (S matrix)
see 散乱行列 (**scattering matrix**)
 s 偏波 see **TE 波**
 Salisbury screen
 absorber 226
 scatterig
 — amplitude 101
 back- — 101
 forward — 102
 — matrix 265
 scattering cross section 101
 back- — 101
 differential — 101
 total — 102
 side lobe 111
 skin depth 16
 slot array antenna 195
 slow wave 79, 81, 123
 Snell's law 68
 spiral antenna 190

split-ring resonator 5
 Schelkunoff — 13
 SRR
 see スプリットリング共振器
 supercell 218
 superposition principle 42, 49
 surface plasmon 83
 surface plasmon-polariton 83
 surface wave 79, 241
 — antenna 124

【T】

TE 波 (TE wave) 69
 TM 波 (TM wave) 70
 total reflection 74, 80
 critical angle of — 74
 transformation 223
 electromagnetics
 transmission matrix
 see **fundamental matrix**

【U】

unitary 266

unit cell 6, 209

【W】

wave equations
 scalar — 52, 90
 vector — 49, 52
 wave number 61, 89
 wave packet 77

【Y】

Y 行列 (Y matrix)
see アドミタンス行列
 (**admittance matrix**)

【Z】

Zenneck wave 83
 Z 行列 (Z matrix)
see インピーダンス行列
 (**impedance matrix**)
 zeroth-order resonance 186

【数字】

0 次共振 see 零次共振

— 著者略歴 —

宇野 亨 (うの とおる)

1980年 東京農工大学工学部電気工学科卒業
1985年 東北大学大学院博士課程修了 (電気及
通信工学専攻)
工学博士
1985年 東北大学助手
1991年 東北大学助教授
1994年 東京農工大学助教授
1998年 東京農工大学教授
現在に至る

道下 尚文 (みちした なおぶみ)

1999年 横浜国立大学工学部電子情報工学科卒業
2004年 横浜国立大学大学院博士課程修了 (物
理情報工学専攻)
博士 (工学)
2004年 防衛大学校助手
2007年 防衛大学校助教
2012年 防衛大学校講師
2014年 防衛大学校准教授
2021年 防衛大学校教授
現在に至る

メタマテリアルアンテナの基礎

Fundamentals of Metamaterial Antennas © Toru Uno, Naobumi Michishita 2021

2021年9月27日 初版第1刷発行



検印省略

著者 宇野 亨
道下 尚文
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来 真也
印刷所 三美印刷株式会社
製本所 有限会社 愛千製本所

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社
CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844 · 電話 (03) 3941-3131 (代)

ホームページ <https://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-00948-4 C3055 Printed in Japan

(谷口)



©COPY < 出版者著作権管理機構 委託出版物 >

本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は、そのつと事前に、出版者著作権管理機構 (電話 03-5244-5088, FAX 03-5244-5089, e-mail: info@jcopy.or.jp) の許諾を得てください。

本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めていません。落丁・乱丁はお取替えいたします。