メタマテリアルアンテナの種明かし

Finding Metamaterial Trick

榊原久二男[†] Kunio Sakakibara[†]

Summary

メタマテリアルの技術を用いることで、伝送線路内を伝わる電磁波の伝搬特性を制御できるため、一般に伝送線路でできているアンテナにこの技術を用いると、様々な効果が期待できる。これを実現するために、メタマテリアルの名前を冠した研究成果が多く発表されてきている。その一方で、既存の技術との違いが分かりにくい研究発表も少なくない。本論文では、メタマテリアル技術をアンテナに適用したときの様々な効果を示し、その原理と問題点について解説する。更に、既存の技術との相違点と共通する点について議論し、メタマテリアルのトリックを種明かししてみたい。

Key words

メタマテリアル, アンテナ, 伝送線路, 波長制御

1. ま え が き

2000 年ごろから、メタマテリアルの研究者が急速に増加し始めて 10 年が経過し、その技術レベルも高まりつつある。その結果、爆発的な普及とはいかないまでも、一部で製品化が始まっている。メタマテリアルに期待されている効果を、製品化される実用レベルで実現するには、まだ課題は山積しているが、設計・解析技術は確立しつつあり、多くの著書が出版されている [1]～[8]。

メタマテリアルは、母材となる伝送線路内部に、周期構造を構成することにより、これまでに自然界では存在し得なかった特性を有する物質のことである [9]～[14]。光分野 [15]、機械分野 [16] などメタマテリアル技術の開発が進められているが、電磁波分野でもその活動は活発である。メタマテリアル技術を電磁波分野に应用すると、電磁波の波長を制御することができる。一般にアンテナの大きさは波長に大きく依存することから、メタマテリアル技術は、これまで普遍的な課題であったアンテナの小形化を一気に解決する技術であるとまでいわれている。それだけに、メタマテリアル技術への期待は大きい。

本論文では、メタマテリアル技術のアンテナ応用として、同じ波長制御技術によって得られる効果であるアンテナの小形化、進行波アレーアンテナの指向性制御の二つに焦点を当て、その原理を説明する。メタマテリアルは、自然界に存在し得ない物質と等価な性質を示すと前述したが、実際には自然界にない物質を精製することは不可能である。そのため、実効的にその特性を実現したのと等価となるようにトリックが仕掛けられている。各応用例に用いられているメタマテリアル技術のトリックについて解説したい。

2. メタマテリアルの波長制御

まず、自由空間や同軸線路、平面線路など、電磁波が伝搬する一般的な伝送線路を考える。これらを等価回路に置き換えると、図 1 (a) に示すように、シリーズ接続のインダクタンスとシャント接続のキャパシタンスをペアとする 2 端子対回路を 1 周期として、これを縦続接続することで表される。この場合には、通常の伝送線路がそうであるように、電磁波の伝搬方向へ移動するほど、位相は遅れるという事実がある。ということは、すなわち、このインダクタンスとキャパシタンスを、図 1 (b) に示すように入れ換えると、電磁波の伝搬方向へ移動す

[†] 名古屋工業大学, 名古屋市
Nagoya Institute of Technology, Nagoya-shi 466-8550, Japan.

図1 伝送線の等価回路

図2 右手系伝送線路と左手系伝送線路の電界・磁界，伝搬方向

るほど、位相が進むことになり、常識的な伝送線路とは逆の位相変化が生じることになる。この様子を図2に示す。一般的な伝送線路を伝搬する平面波は、電界と磁界と「電力が伝わる方向」の三つが互いに垂直で、この順に右手系をなすことが知られている。このとき、電力が伝わる方向へ移動するほど位相は遅れるため、電界と磁界と「位相遅れが伝わる方向」の三つも互いに垂直で、右手系をなす。そのため、この伝送線路のことを、右手系伝送線路と呼ぶ。一方、図1(b)に示す伝送線路では、電力が伝わる方向へ移動するほど位相が進むため、図2(b)に示すように、位相遅れが伝わる方向が、電力が伝わる方向と逆となる。このとき、電界と磁界と位相遅れが伝わる方向の三つが、互いに垂直でかつ左手系をなす。そのため、この伝送線路のことを、左手系伝送線路と呼ぶ。左手系伝送線路は、波形（位相遅れ）が伝わる方向（見かけの伝搬方向）と電力が伝わる方向（本当の伝搬方向）が逆方向である。例えて言えば、図3に示すように、足の動き（見かけの歩行方向）と本当に進む方向が逆方向と

図3 足の動きと進む方向が逆になるマイケル・ジャクソンのムーンウォーク

なるマイケル・ジャクソンのムーンウォークが分かりやすい。

位相が変化する方向（右手系伝送線路と左手系伝送線路）や、位相が変化する割合（実効波長）を制御できると、共振条件を制御できたり（素子アンテナの小形化 [17]～[23]）、複数の電磁波が強め合う方向を制御できたり（アレーアンテナの指向性制御 [24]～[33]、グレーティングローブ抑圧 [34]）して、アンテナ利用への効果大きい。

果たしてそのような伝送線路を実現することができるのであろうか。このコンセプトを基にして、これまでに、世の中で開発されている左手系伝送線路では、一般的な右手系伝送線路内部に左手系素子（シリーズ接続のキャパシタンスと、シャント接続のインダクタンス）を組み込むことにより構成されている。このため、等価回路で表すと、図1(c)で表されるように、右手系素子と左手系素子の両方が混在する右手/左手系複合伝送線路で表される。この右手系と左手系の効果の綱引きにより、伝送線路の伝送特性が決まる。

図1に示す回路構成はフィルタの回路構成と似ており、(a)は低域、(b)は高域、(c)は帯域フィルタの等価回路として知られている。メタマテリアルの機能として、位相制御のほかに、電磁バンドギャップ (EBG: Electromagnetic Band Gap) と呼ばれる伝搬の可否（振幅）の制御も可能である。この基本的な考え方は、フィルタ理論によって既に知られている。メタマテリアルの出現により、その概念があらゆる電磁波の伝搬について拡張された。そして一次元の電磁波の伝搬だけでなく、二次

元の伝搬の制御に使われたり、上記のように伝搬波長（位相）の制御に使われたりするようになった。

3. アンテナ応用

アンテナは伝送線路でできている。そのため、この伝送線路の伝搬特性を制御できれば、アンテナに新しい付加価値を加えることができる。例えば、図4に示すような、ダイポールアンテナやモノポールアンテナ、ループアンテナ、スロットアンテナ、プリント基板に構成されるマイクロストリップパッチアンテナなどがある。これらの素子アンテナは、半波長など、波長に依存する長さで共振し、ある特定の周波数で動作するように設計される。すなわち、波長を制御できれば、アンテナの小形化が可能となる。

また、漏れ波アンテナは給電用伝送線路の伝搬波長と自由空間波長の比で、進行波アレーアンテナは給電用伝送線路の伝搬波長と素子間隔の比で、電波の放射方向が決まる。そのため、メタマテリアルの技術により伝送線路の伝搬波長を制御できれば、アンテナの「指向性」をも制御することが可能である。3. では、位相（波長）制御に焦点を絞り、アンテナに応用したときの効果について解説する。

図4 様々なアンテナの長さ

3.1 アンテナの小形化応用

アンテナの小形化は普遍的な課題である。メタマテリアルの技術によって、この長年の課題が解決されることが期待されている。究極的には、超高感度な極微チップ

アンテナを実現したいという話を、ときどき耳にする。アンテナが給電線路と整合するためには、アンテナの入力インピーダンスの実部（放射抵抗）が給電線路の特性インピーダンス（例えば $50\ \Omega$ ）に等しく、虚部がゼロとなるように設計しなければならない。ところが、アンテナを小形化した場合、アンテナの放射抵抗が小さくなり、虚部が大きくなるため、給電線路と整合できなくなるという問題がある。

そこで、まず実部の放射抵抗については、これを決めるパラメータとして実効長がある [35]。ダイポールアンテナの場合、放射抵抗は実効長の2乗に比例し、このアンテナの実効長はアンテナ上の電流分布の積分値に比例する。物理長が短いアンテナでは電流分布が一定に近いので、実効長は物理長と概ね等しくなり、これが実効長の上限となる。しかし、メタマテリアルの技術を用いると、電流分布を変化させることができるため、その結果、放射抵抗が大きくなる。また、虚部についても小さくできる。例えば、波長無限大の伝送線路を設計することにより、任意の長さで共振するアンテナを実現できる。また、擬似誘電体を用いると、伝搬波長が短縮され、アンテナを小形化することができる。このほかにもメタマテリアルによるアンテナの小形化応用技術が提案されているが、本論文ではメタマテリアルの位相（波長）制御に焦点を当てているので、以下では、これら二つのアンテナ小形化技術について紹介する。

(1) 波長無限大の伝送線路

2. で示したように、メタマテリアル伝送線路は、右手系伝送線路内部に左手系素子を組み込んで構成される。1周期分の等価回路を図5に示す。 L_R と C_R が元の右手系伝送線路の等価回路で、 L_L と C_L が組み込まれた左手系素子の等価回路を表す。右手系伝送線路では位相遅れが生じ、左手系素子では位相進みが生じる。これらの綱引きにより、伝送線路全体として、右手系として

図5 右手 / 左手系複合伝送線路の1周期分

動作するのか、左手系として動作するのかが決まる。右手系伝送線路に左手系素子を組み込み、左手系素子の効果を大きくすると、右手系の位相変化が次第に小さくなり、すなわち波長が長くなる。そして、右手系の作用と左手系の作用がちょうど等しくなり、両者がキャンセルされたとき、位相変化が全くしない伝送線路となり、実効的に波長が無限大となる。このとき、シリーズ接続分とシャント接続分がそれぞれ直列共振、並列共振となり、以下の条件を満たす。

$$\frac{C_R}{C_L} = \frac{L_R}{L_L}$$

このときには、各周期ごとの共振がすべて同相で起こることにより、線路上での位相がすべて同じになることで、波長が無限大になったのと同じ効果が得られる。一般的にアンテナの共振長は、1/2 波長など、波長に依存する。しかし、無限波長の伝送線路を用いることにより、どんな長さで切っても（もちろん極端に短くても）共振特性が得られ、金太郎飴のようにアンテナを設計できることから、アンテナの小形化に用いられる。

この技術を利用し、最小単位である 1 周期分を小形アンテナとして設計した成果が、学会で発表されたり、メタマテリアルアンテナとして製品化されたりしている。これらの発表によると、アンテナ内部に、シャント接続のインダクタンスやシリーズ接続のキャパシタンスを組み込んだアンテナのことをメタマテリアルアンテナと称している。これは、従来から用いられている、小形アンテナの給電点に、コイルとコンデンサからなる LC 整合回路を組み込んだアンテナとよく似ている。

(2) 擬似誘電体伝送線路

誘電体を用いるとその誘電率に依存して波長短縮が生じるため、樹脂材料などを用いることによりアンテナを小形化する技術が広く用いられている。しかし、誘電体損や製造上の問題などを避けるために、誘電体を使いたくない場合や、既に誘電体を使っていて更にその効果を大きくしたい場合などに、主に金属の構造で波長短縮を実現する擬似誘電体構造が提案されている。

2. で示した等価回路の考え方で説明すると、右手/左手系複合伝送線路では、右手系伝送線路に左手系素子を組み込んだが、これとは逆に波長短縮効果をより拡大するためには、右手系伝送線路に更に右手系素子を組み込む。擬似誘電体伝送線路の 1 周期分の等価回路を図 6 に

図 6 擬似誘電体伝送線路の 1 周期分の等価回路

示す。 L_{R1} と C_{R1} は、元の伝送線路の右手系成分である。左手系伝送線路では、これに左手系成分である L_L と C_L を追加することで、図 5 の等価回路が得られた。一方、擬似誘電体線路では、元の伝送線路の右手系成分 (L_{R1} , C_{R1}) に、更に右手系成分 (L_{R2} , C_{R2}) を追加することにより、位相遅れが促進され、その結果実効波長が短くなる。

一般的には、給電点に LC 整合回路を接続して整合する方法がよく用いられる。これに対し、メタマテリアルでは、アンテナの途中の 1 周期ごとに、整合回路を分布して接続する。では、給電点で LC 整合させるのと、アンテナの途中にインダクタンスやキャパシタンスを設けて整合させるのとで、何が違うであろうか。メタマテリアルの手法のように、アンテナの途中に LC 回路を組み込む価値があるのであろうか。両者の間には、アンテナ上の電流分布に違いが生じる。アンテナの感度に直結するアンテナの実効長は、アンテナ上の電流分布の積分値で決まるため、電流が大きいほど、アンテナ長が長いほど大きくなる。そこで、モノポールアンテナに生じる電流分布について考える。

アンテナと給電ケーブルとの接続部での反射損を低減するためには、アンテナの入力インピーダンスが給電ケーブルの特性インピーダンスと一致し、整合されなければならない。モノポールアンテナは、地板についてのイメージを考えるとダイポールアンテナと等価で、終端が開放された平行二線伝送線路からなると考えられる。終端開放であるモノポールアンテナの長さを短くすると、インピーダンスの実部が小さくなるのと同時に、キャパシタンスが発生する ($Z = R - jX$)。これを相殺するためには、整合回路として一般に、インダクタンス (コイル) を接続する。一方、アンテナの入力インピーダンスは、入力端子における電圧と電流の比であり、アンテナ長を短くすると、給電点における電流値が非常に小さくなってしまう。給電ケーブルと整合されるには、給電

点における電流値がある値にまで大きくなる必要がある。コイルは、物理的な大きさを保ったまま、電流が流れる経路を長くすることにより、アンテナの実効的な長さを延ばす効果がある。1/4 波長よりも十分に短いアンテナの給電点にインダクタンス (L : コイル) を接続して給電した場合の電流分布を図 7 に示す。コイルを接続する前 (図 7 (a)) は、給電点において小さい電流値であるのに対し、コイルを接続することによって (図 7 (b)), 給電点における電流値が大きくなる。しかし、アンテナそのものに流れる電流値は小さいままなので、コイルの効果によって整合はとれるが、アンテナの性能を表す実効長は短いままであり、アンテナの利得の上昇には限界がある。

図 7 アンテナ上の電流分布. (a) 整合回路なし, (b) 給電点で LC 整合, (c) アンテナ上に分布させて整合

次に、モノポールアンテナの途中にコイルを分布させて設けた場合の電流分布を図 7 (c) に示す。給電点で一度に電流を増加させる方法に対して、アンテナの途中に複数個のコイルを互いに間隔を開けて接続し、少しずつ電流値を増加させた場合には、コイルの接続箇所ごとに電流値が増加する。このため、電流分布の積分値は、給電点で整合した場合と比べて大きくなり、その結果、実効長が長くなる。単に整合がとれるという観点で言えば、両者の間で大きな違いはないが、整合回路を分布させて接続した方が、利得が高くなるという効果がある点で、メタマテリアルを用いた方が優れている。しかし、アンテナの途中に回路を接続することにより、損失が増加したり、屋外利用には適さなかったりするという、実効長の効果とトレードオフになる性質が考えられるため、注意して使用する必要がある。

本技術がアンテナの小形化に役に立つことを紹介したが、そのほかの擬似誘電体の使い方として、進行波ア

レーアンテナのグレーティングローブ抑圧に役立つことが明らかにされている。グレーティングローブとは、アレー素子間隔が長くなるほど、天頂に近い側に現れる、広角方向の不要放射である。例えば、1 自由空間波長間隔で、放射素子が同相励振されて配列されたとき、正面方向だけでなく、素子の配列方向にも、1 波長分の伝搬を介して、全素子からの放射が同相で強め合う。これがグレーティングローブの一例である。このように、グレーティングローブは、素子間隔が 1 自由空間波長以上のときに現れ、その間隔が広いほど、天頂に近い側に発生する。

導波管で進行波アレーアンテナを給電し、ブロードサイドビームを実現するためには各素子を同相で励振する必要がある。このとき、各素子間隔は 1 管内波長間隔となる。導波管の管内波長は一般に、自由空間波長よりも長いので、1 管内波長間隔で放射スロットを配列すると、素子間隔が自由空間波長よりも長くなり、前述のグレーティングローブが発生してしまうという問題がある。そ

図 8 右手系素子を組み込んだ導波管の 1 周期構造

図 9 擬似誘電体導波管伝送線路の断面構造

図 10 擬似誘電体導波管伝送線路で構成した進行波アレーアンテナの指向性の測定結果

ここで、例えば図 8 に示すような右手系素子（容量性絞りと広壁面に短絡スタブ）を導波管内に組み込むことにより、波長が短縮され、擬似誘電体線路として作用する。

試作したアンテナの写真を図 9 に示す。導波管の底面に短絡スタブと容量性絞りが交互に構成されている。このアンテナの指向性を測定した実験結果を図 10 に示す。周期構造を組み込んでいないアンテナの場合には、各放射素子が同相励振となるための素子間隔が自由空間波長よりも長いため、約 $\pm 50^\circ$ 方向にグレーティングローブが発生している。一方、周期構造を組んだアンテナの方は素子間隔が短縮され、主放射方向が変化することなく、グレーティングローブが現れていない。

3.2 右手 / 左手系複合伝送線路による漏れ波アンテナの指向性制御

右手 / 左手系複合伝送線路を用いることで、波長を制御できることは 2. で述べた。そして、3.1 では、アンテナの小形化が実現可能であることを述べた。これは、伝送線路の位相が変化する割合、すなわち、位相定数を制御できることを示している。位相定数もやはり、右手系の影響と左手系の影響の大小関係で、位相定数の正負が決まる。一般の伝送線路は右手系伝送線路であるので、これを用いて漏れ波アンテナを構成した場合には、ブロードサイド方向から伝搬方向側へ傾いた前方放射指向性（前進波）しか実現できない。しかし、左手系伝送線路の場合には、負の位相定数を実現できるので、ブロー

図 11 右手 / 左手系複合導波管伝送線路による漏れ波スロットアレーアンテナ

図 12 右手 / 左手系複合導波管伝送線路の内部構造

ドサイドから伝搬方向と逆側に傾いた後方放射指向性（後進波）も実現可能である。したがって、左手系伝送線路を用いることにより、指向性の設計自由度が広がったといえる。

ここでも、導波管で左手系伝送線路を開発した例について紹介する。図 11 に右手 / 左手系複合導波管伝送線路によって構成した漏れ波アレーアンテナを示す。図 5 の左手系素子のうち、シリーズ接続のキャパシタンス C_L は、広壁に接続されている終端短絡スタブで構成されており、シャント接続のインダクタンス L_L は、狭壁から内側に延びる絞り構造で実現している。図 12 に写真を示す。右手系の特性が現れるか左手系の特性が現れるかは、右手系と左手系の大小関係のバランスで決まる。周期長は、1 周期当りの右手系成分の位相回転量に相当するため、左手系の効果を大きくするためには、左手系成分の位相変化を大きくするか、あるいは右手系成分の位相変化を

— : 左手系放射 10 GHz — : 右手系放射 12 GHz

図 13 右手系伝送による前方放射と左手系伝送による後方放射指向性の測定結果

小さくする必要がある。ここでは、右手系成分の位相変化が小さくなり、周期が極力短くなるように設定した。

図 13 に、右手系動作のときの周波数 12 GHz における指向性と、左手系動作のときの周波数 10 GHz における指向性を示す。正の角度に主放射方向が向いているのが右手系伝送線路による前方放射で、負の角度に主放射方向が向いているのが左手系伝送線路による後方放射である。これにより左手系伝送線路の動作が確認された。

次に、右手 / 左手系複合伝送線路を用いて移相器を構成し、ビームスキャンアンテナを実現した場合について、その特性を示す。一般に漏れ波アンテナでは、周波数を変化させることで伝送線路内の伝搬波長を変え、指向性の最大放射方向を変化させる。ところが、近年のビームスキャンアンテナでは、自動車レーダを例にとってみると、ドップラー周波数変化によって相対速度を求めたり、FM (Frequency Modulation) 変調を加える FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave) 方式によって相対速度や距離を検出したりして、周波数情報を信号処理に用いている。使用周波数帯域幅内では特性が変化しないことが重要となってきた。そこで、電気信号や機械的な動きによって伝搬波長を制御することができれば好都合である。開発した右手 / 左手系複合導波管伝送線路には、短絡スタブと誘導性絞りが組み込まれており、これらによって、伝搬波長を制御している。ということは、何らかの方法でこれらの構造を変化させることができれば、伝搬波長を変化することができ、指向性を走査することができるはずである。ここでは、スタブ長を可

図 14 可変スタブ長右手 / 左手系複合伝送線路を用いた漏れ波導波管スロットアレーアンテナの指向性

図 15 可変スタブ長右手 / 左手系複合伝送線路を用いた漏れ波導波管スロットアレーアンテナの指向性走査特性

変とし、伝搬波長を変化させることで、指向性の走査を試みた。図 14 に指向性の変化する様子を示し、図 15 に指向性ビーム走査特性を示す。スタブ長が 22 mm のときに指向性は -60° 、25 mm のときに指向性は -10° となっており、スタブ長を変化させることにより指向性の方向を制御できることが示された。これはすなわち、右手 / 左手系複合導波管伝送線路を用いて移相器を実現したことになる。

これまでに右手 / 左手系複合導波管伝送線路について議論してきた。その中で、左手系動作のときには、位相が逆回転するのと等価な現象が現れた。しかし、物理現象として、位相が逆回転するということが、果たしてあるのだろうか。右手 / 左手系複合導波管伝送線路で、この現象を分析してみる。図 16 に、左手系導波管で想像される実際の動作を示す。仮に、1 周期当り、位相が $+30^\circ$ 進む左手系導波管を設計したとする。このと

図 16 左手系導波管で想定される実際の動作

き、短絡スタブの往復を経由して 1 周期分を伝搬した電磁波に -330° の位相遅れが生じたら、あたかも $+30^\circ$ の位相進みが生じたのと等価である。スタブ長を調整することにより、位相変化量を調整することができる。ほかにも様々な伝送線路で左手系伝送線路が提案されているが、これらには、何らかの構造で、シャント接続のインダクタンスと、シリーズ接続のキャパシタンスが接続されている。追加された構造には電流が流れることになるため、その電流がう回することによって大きい位相遅れが生じる。これによって図 16 に示すような位相進みが生じているのと等価な状況を作り出していると考えられる。全く等価なら問題はないが、電流がそれだけの電気長だけう回するということは、それだけ伝送損が増加することになる。低い周波数ならこの損失増加は小さいと考えられるが、高い周波数帯ではこの損失は無視できないであろう。この損失も考慮に入れて、利用を検討すべきである。

4. む す び

メタマテリアルを電磁波の分野に用いることで、位相が変化する方向（右手系 / 左手系）とその割合（波長）を制御できることが知られており、アンテナへの利用が考えられている。しかし、これらの幾つかは、別な解釈によって、既存の技術で説明することもできる。本論文では、これら、メタマテリアル技術による位相変化のコンセプトを説明するとともに、これらの事実を既存の技術で説明し、種明かしを試みた。

メタマテリアル伝送線路の実用化への課題は、損失の問題が大きい。伝送線路内にインダクタンスやキャパシタンスに相当する構造を組み込むことになるため、特に

高周波において、損失の問題が大きくなる。10 GHz 以上の高い周波数へ応用する場合には、損失の問題を解決しなければならない。その一方で、アンテナの小形化の効果が大きいのは、波長が長い低周波での応用である。そのため、メタマテリアルのアンテナ応用においては、数 GHz 以下の低い周波数で使う方が、現段階では現実的だと思われる。それでも、今回は触れなかったが、動作周波数帯域幅が狭いという問題や、構造が複雑になるため、製造コストが上昇する問題などが残っている。これらの問題を解決することで実用化が進むであろう。

文 献

- [1] N. Engheta and R. W. Ziolkowski, *Metamaterials, Physics and Engineering Explorations*, IEEE Press, 2006.
- [2] C. Caloz and T. Itoh, *Electromagnetic Metamaterials*, Wiley, 2006.
- [3] F. Yang and Y. Rahmat-Samii, *Electromagnetic Band Gap Structures in Antenna Engineering*, Cambridge University Press, 2009.
- [4] G. V. Eleftheriades and K. G. Balmain, *Negative-Refractive Metamaterials, Fundamental Principles and Applications*, IEEE Press, 2005.
- [5] R. Marques, F. Martin, and M. Sorolla, *Metamaterials with Negative Parameters, Theory, Design, and Microwave Applications*, John Wiley & Sons, Inc., 2008.
- [6] S. Zouhdi, A. Sihvola, and M. Arsalane, *Advances in Electromagnetics of Complex Media and Metamaterials*, NATO Science Series, 2002.
- [7] S. Zouhdi, A. Sihvola, and A. P. Vinogradov, *Metamaterials and Plasmonics : Fundamentals, Modelling, Applications*, NATO Science for Peace and Security Series, Springer, 2008.
- [8] 石原照也監修, 新材料・新素材シリーズ, メタマテリアル—最新技術と応用—, シーエムシー出版, 2007.
- [9] V.G. Veselago, "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ ," *Soviet Phys. Usp.*, vol. 10, no. 4, pp.509-514, Jan. /Feb. 1968.
- [10] J. B. Pendry, "Negative refraction makes a perfect lens," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 85, no. 18, pp. 3966-3969, Oct. 2000.
- [11] J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, and W. J. Stewart, "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena," *IEEE Trans. MTT*, vol. 47, no. 11, pp. 2075-2084, Nov. 1999.
- [12] 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.*, vol. 84, no. 18, pp.4184-4187, May 2000.
- [13] C. Caloz and T. Itoh, "Novel microwave devices and

- structures based on the transmission line approach of meta-materials," IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig., pp.195-198, June 2003.
- [14] A. Grbic and G. V. Eleftheriades, "Experimental verification of backward-wave radiation from a negative refractive index material," J. Appl. Phys., vol. 92, no. 10, pp. 5930-5935, Nov. 2002.
- [15] V. M. Shalaev and W. Cai, Optical Metamaterials, Fundamentals and Applications, Optics & Lasers, Springer, 2010.
- [16] N. Kikuchi, "A structural optimization software for topology, shape, and sizing optimization," Series of Lectures at Institute of Advanced Engineering (IAE), Daewoo Group, Korea, Oct. 12-17, 1997. <http://www-personal.umich.edu/kikuchi/Research/OPTISHAPE2.PDF>
- [17] K. Buell, H. Mosallaei, and K. Sarabandi, "A substrate for small patch antennas providing tunable miniaturization factors," IEEE Trans. Microw. Theory & Tech., vol. 54, no. 1, pp. 135-146, Jan. 2006.
- [18] M. Lee, B. A. Kramer, C. Chen, and J. L. Volakis, "Distributed lumped loads and lossy transmission line model for wideband spiral antenna miniaturization and characterization," IEEE Trans. Antennas & Propag., vol. 55, no. 10, pp. 2671-2678, Oct. 2007.
- [19] A. Sanada, M. Kimura, I. Awai, C. Caloz, and T. Itoh, "A planar zeroth-order resonator antenna using a left-handed transmission line," 34th Europ. Microw. Conf. Proc., pp.1341-1344, Amsterdam, Netherlands, Oct. 2004.
- [20] C. J. Lee, K. M. K. H. Leong, and T. Itoh, "Composite right/left-handed transmission line based compact resonant antennas for RF module integration," IEEE Trans. Antennas & Propag., vol.54, no.8, pp.2283-2291, Aug. 2006.
- [21] 林 承彬, 新井宏之, "左手系同軸構造を用いた 1/4 モノポールアンテナ," 信学技報, AP2006-92, Oct. 2006.
- [22] H. Iizuka and P. Hall, "Left-handed dipole antennas and their implementations," IEEE Trans. Antennas & Propag., vol. 55, no. 5, pp.1246-1253, May 2007.
- [23] 佐原秀輔, 真田篤志, 久保 洋, "左手系零次共振器の基本共振特性," 信学総大, CS2-4, pp.24-25, March 2005.
- [24] C. Caloz and T. Itoh, "Transmission line approach of left-handed (LH) materials and microstrip implementation of an artificial LH transmission line," IEEE Trans. Antennas & Propag., vol. 52, no. 5, pp. 1159-1166, May 2004.
- [25] C.A. Allen, C. Caloz, and T. Itoh, "Leaky-waves in a metamaterial-based two-dimensional structure for a conical beam antenna application," IEEE MTT-S Dig., pp. 305-308, Los Angeles, June 2004.
- [26] A. Lai, K. M. K. H. Leong, and T. Itoh, "Infinite wavelength resonant antennas with monopole radiation pattern based on periodic structures," IEEE Trans. Antennas & Propag., vol.55, no.3, pp.868-876, March 2007.
- [27] A. Sanada, C. Caloz, and T. Itoh, "Novel zeroth-order resonance in composite right/left-handed transmission line resonators," Asia-Pacific Microw. Conf. Proc., vol.3, pp.1588-1592, Dec. 2003.
- [28] T. Ikeda, K. Sakakibara, T. Matsui, N. Kikuma, and H. Hirayama, "Beam-scanning performance of leaky-wave slot-array antenna on variable stub-loaded left-handed waveguide," IEEE Trans. Antennas & Propag., vol. 56, no. 12, pp. 3611-3618, Dec. 2008.
- [29] J. Muramatsu, T. Watanabe, K. Sato, A. Abe, N. Michishita, and Y. Yamada, "The pattern-controllable novel small antenna with CRLH parasitic element," IEEE Antennas & Propag. Society Int. Symp., 402.7, pp.1-4, Charleston, June 2009.
- [30] 鎌田伸二, 道下尚文, 山田吉英, "梯子型右手/左手系複合伝送線路による UHF 帯漏れ波アンテナ," 信学総大, B-1-166, March 2009.
- [31] S. Lim, C. Caloz, and T. Itoh, "Metamaterial-based electronically controlled transmission-line structure as a novel leaky-wave antenna with tunable radiation angle and beamwidth," IEEE Trans. Microw. Theory & Tech., vol. 53, no. 1, pp.161-173, Jan. 2005.
- [32] T. Ikeda, K. Sakakibara, T. Matsui, N. Kikuma, and H. Hirayama, "Beam-scanning performance of leaky-wave slot-array antenna on variable stub-loaded left-handed waveguide," IEEE Trans. Antennas & Propag., vol. 56, no. 12, pp. 3611-3618, Dec. 2008.
- [33] Y. Dong and T. Itoh, "Right/left-handed substrate integrated waveguide leaky-wave antennas," 39th Europ. Microw. Conf., EuMC14-5, Rome, Italy, Sept. 2009.
- [34] T. Matsui, K. Sakakibara, Y. Ikeno, K. Kawaguchi, N. Kikuma, and H. Hirayama, "Control of effective wavelength in the waveguide for grating lobes suppression of slotted waveguide array," Proc. iWAT2008, P302, pp. 422-425, Chiba, Japan, 2008.
- [35] 稲垣直樹, 電気電子学生のための電磁波工学, 丸善, 東京, 1980.

(平成 22 年 6 月 16 日受付, 8 月 1 日再受付)

榊原久二男 (正員)

1991 名工大・工・電気情報卒。1996 東工大大学院博士課程了。同年 (株) 豊田中央研究所入社。2002 名工大講師, 2004 同大学助教授, 2007 准教授, 現在に至る。2000~01 独ウルム大客員研究員。工博。ミリ波アンテナ, 移動体通信用アンテナの研究に従事。IEEE シニア会員。