

# 博士学位論文審査要旨

2018年8月28日

論文題目：遮断TEおよびTMモードを用いた右手/左手系複合導波管の伝送・放射特性

学位申請者：西村 茂幸

審査委員：

主査：理工学研究科 教授 辻 幹男

副査：理工学研究科 教授 岩井 誠人

副査：理工学研究科 教授 出口 博之

要 旨：

本論文は、等価的に負の誘電率、負の透磁率を同時に示す人工媒質であるメタマテリアルを実現する左手系媒質の新たな導波管構造を提案するとともに、それを漏洩波アンテナに応用した研究成果についてまとめたもので、7章より構成されている。

第1章では、本論文の研究の目的、ならびにメタマテリアルの歴史、検証課題など今日まで行われてきた研究の概要を述べることにより、本研究の背景を明らかにしている。

第2章では、メタマテリアルとして動作する左手系導波管の動作原理の概要を述べ、遮断TEモードとTMモード導波管を交互に接続すれば、左手系導波管が構成できることを示している。

第3章では、円形導波管の遮断TMモードとして励振同軸線路のTEMモードに近い分布の $TM_{01}$ モード、また遮断TEモードとして円形導波管を薄い導体隔壁で4分割した扇型導波管の基本TEモードを用いることで、右手/左手系複合円筒導波管を構成できることを、またTEモード導波管へのリッジの導入により阻止帯域のないバランス条件を満たせることを示している。そして、これら複合導波管の伝送特性の数値計算結果と10GHz帯で試作した導波管の伝送特性の測定結果との比較から、提案構造の有用性を実験的にも検証している。

第4章では、前章で提案した円筒導波管の壁面にスロットを設けることで漏洩波アンテナに応用し、スロットの配置や個数に対するアンテナの放射角度や放射強度の数値解析を行っている。また、バランス条件を満たした漏洩波アンテナを試作し、周波数掃引によりシームレスな後方、前方へのビーム走査が可能なことを実験的にも検証している。

第5章では、方形導波管の遮断TMモードとして励振同軸線路のTEMモードに近い分布を持つ $TM_{11}$ モードを、また遮断TEモードとして方形導波管をH型導体隔壁で4分割した方形導波管の基本 $TE_{10}$ モードを用いることで、右手/左手系複合方形導波管を構成している。そして、そのH型導体隔壁の厚みを変えることでバランス条件を満たせることも伝送特性の数値計算結果から明らかにしている。さらに、10GHz帯で試作した導波管の伝送特性の測定結果から、提案構造の有用性を実験的にも検証している。

第6章では、前章で提案した右手/左手系複合方形導波管の上部管壁にスリットを設けることで漏洩波アンテナに応用し、スリットからの放射角度や放射強度の数値計算結果と試作漏洩波アンテナの放射特性の測定結果から、提案構造の方形導波管型漏洩波アンテナの有用性を明らかにしている。

第7章では、本論文全体の結論の要点をまとめ、その新規性、将来性を示している。最後に、御指導ないし、御協力を頂いた方々に対する謝辞を述べている。

以上述べたように、本論文で行ってきた著者の研究は、学術面における幾つかの重要な成果を挙げ

ているのみならず、高周波数帯域における人工媒質に関する先駆的かつ実用的な研究であり、この分野の発展に多大なる貢献をなすものである。

よって、本論文は博士（工学）（同志社大学）の学位論文として十分な価値を有するものと認められる。

## 総合試験結果の要旨

2018年8月28日

論文題目：遮断TEおよびTMモードを用いた右手/左手系複合導波管の伝送・放射特性

学位申請者：西村 茂幸

審査委員：

主査：理工学研究科 教授 辻 幹男

副査：理工学研究科 教授 岩井 誠人

副査：理工学研究科 教授 出口 博之

要 旨：

本論文提出者は、2015年4月より大学大学院理工学研究科博士課程後期課程に在学している。本論文の主たる内容は、Progress In Electromagnetics Research M に1編、Proc. IEEE Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation に1編、Proc. Intern. Conf. on Electromag. In Advanced Appl. に2編、Proc. Intern'l Symp. Antennas and Propagation に1編、Dig. IEEE AP-S Intern'l Symp. に1編掲載され、すでに十分な評価を受けている。

2018年8月8日15時より、約2時間にわたり提出論文に関する学術講演会(博士論文公聴会)が開かれ、種々の質疑討論が行われたが、提出者の的確なる説明により、十分な理解が得られた。さらに、講演会終了後、審査委員により論文に関連した諸問題、および電気工学、電子工学の基礎ならびに応用分野に関連した諸問題につき口頭試問を実施した結果、十分な学力を確認できた。提出者は、英語の語学試験に合格し、国際会議においても英語で数多くの発表を行っており、十分な語学能力を有すると認められる。

よって、総合試験の結果は合格であると認める。

# 博士學位論文要旨

論文題目： 遮断 TE および TM モードを用いた右手/左手系複合導波管の伝送・放射特性

氏名： 西村 茂幸

## 要旨：

近年、等価的に負の誘電率、負の透磁率を同時に示す人工媒質であるメタマテリアルが注目されている。その歴史は 1968 年に Veselago によってそのような物質中に後退波が伝搬することが理論的に検証された。メタマテリアルは様々な定義付けがされており、Walsler はメタマテリアルとは通常の複合材料の限界を超えた物性、機能をもつように設計された物質と定義した。また、誘電率と透磁率が同時に正である媒質以外を超自然媒質と定義した。その他には、堀が、メタ表面(サーフェス)は自然界には存在しない反射特性をもつ人工表面と定義した。

メタマテリアルは、1996 年にイギリスの Pendry は細線導体の配列が負の誘電率を与えることを示し、次に 1999 年に Pendry がスプリットリング共振器の配列が負の透磁率を与えることを示した。これらより 2000 年に Simth らによって Pendry の人工媒質の組み合わせにより、電磁波が透過することを実験で検証し、2001 年にプリズム構造を用いて負の屈折率が実証された。これらによってメタマテリアルの研究は盛んになっていった。そして、2002 年に Itoh と Eleftheriades はそれぞれ広帯域な周波数領域で動作する左手系伝送線路を発表し、このメタマテリアルの伝送線路によるアプローチは今日におけるマイクロ波回路やアンテナ回路に有効に取り入れられつつある。

メタマテリアル技術はマイクロ波回路やアンテナの小形化や高機能化を飛躍的に前進させる 1 つの技術として期待されている。従来の伝送線路理論が左手系まで拡張されたことで、設計素子の自由度が広がり、従来にはない特性をもつ回路やアンテナを実現してきている。電磁メタマテリアルの電磁波制御により実現されてきたアンテナの例を挙げていく。左手系媒質中を進む電磁波の向きに対して、位相が反対向きに進む、いわゆる後退波が伝搬する現象を用いて伝搬位相制御を行うことにより、マイクロストリップ線路上において直列キャパシタンスと並列インダクタンスを挿入する共振型の小型アンテナが実現できる。また伝送線路の端を終端にすれば非共振型アンテナとして漏洩波アンテナが実現でき、通常の右手系線路に左手系領域が加わることで動作周波数の広帯域化が可能であり、さらに後方から前方へのビーム走査が可能となる。媒質中の特性インピーダンスは誘電率と透磁率で表すことができるため、特性インピーダンスはメタマテリアルで制御が可能であり、例えば、容量性リアクタンスが非常に大きい電気的小形ダイポールアンテナを負誘電率殻で覆うことにより従来にはない新たな整合法をもつアンテナが提案されている。屈折率は媒質の誘電率と透磁率の項を含み、その屈折率を表すスネルの法則においてもメタマテリアルを用いると負の屈折を生じさせ、平面レンズに対して、波源と反対側にイメージを作る再集束を起こすことになる。そのような媒質は完全レンズと呼ばれ Pendry によって予言されていたものである。また、同様の屈折率制御技術を応用して、物体に対して伝搬してきた光が物体の反対側においても元の伝搬の延長線上においても維持されることを利用して、物体が透明であるかのように振る舞う透明マントと呼ばれるクロウキングやステルス技術の研究が進められている。電波を遮断する周波数帯域を持つ周期構造は電磁バンドギャップ(EBG)構造と呼ばれ、マイクロストリップ線路の地導体面に円形穴を空けた地板で阻止帯域特性を得たり、 $1/4$  波長コルゲーションにより高インピーダンス境界条件を満たしたり、平面回路上のマッシュルーム構造により低姿勢で表面波に対して EBG 構造を構成したりする伝搬振幅制御に対しても様々な研究

が報告されている。

伝送線路においてメタマテリアルは媒質中で波の伝搬方向がエネルギーの伝搬方向と逆になる、つまり後退波が伝搬することから漏洩波アンテナに適応することで後方へのビーム走査が実現可能となる。この特性は伝送線路において、等価回路的に直列キャパシタンスと並列インダクタンスを挿入することで実現できる。しかし、基となる伝送線路における通常の右手系成分が不可避免的に存在するため、純粋な左手系成分のみの伝送線路として動作することはなく、右手系成分と左手系成分が複合した右手/左手系複合伝送線路(CRLH-TL: Composite Right/Left Handed Transmission Line)として動作する。これまでの研究によって様々な伝送線路で CRLH-TL の構成法が提案されてきた。

伝送線路として導波管を用いた CRLH-TL も数多く研究されている。方形導波管に容量性短絡スタブと誘導性窓をつけることで左手系伝送線路を構成している。また、方形導波管であれば、TE モードが遮断周波数以下のエバネセント領域において等価的に負の誘電率を示すことを利用してこれに負の透磁率を示す素子を加えることで左手系線路の実現が報告されているが、導波管の製作や各素子の自由度の低さから左手系領域で電磁波の透過は生じているものの阻止帯域が広い実用的な周波数特性を得にくく、また製作の困難さで漏洩波アンテナへの応用には適さないものである。その他の形状として、励振に主導波管の寸法よりも大きな導波管を接続し主導波管よりも大きな寸法の短絡スタブを設けた左手系線路の構成や短絡スタブを斜めにするこことやスタブにリッジを設けることで導波管全体の大きさを小さくする工夫がなされてきた。短絡スタブは  $1/4$  波長の長さが必要となるためスタブ長を削減する構成法も多く提案されている。二つの主導波管を用い、その間をスタブで接続し、お互い奇モード励振によってスタブで電気壁をつくりスタブ長を短くする構成、導波管終端部で反射して同様に電気壁を利用する導波管が提案されている。他にも、短絡スタブ内に誘電体を挿入することでスタブ長を短くする構造が提案されているが、導体と誘電体の製作が難しく、より製作が容易で低損失な構造をもつ CRLH-TL が求められている。TE モードと同様に TM モードの遮断周波数以下のエバネセント領域において等価的に負の透磁率を示すことを利用してこれに負の誘電率を示す素子を加えることで左手系線路の実現も報告されている。例として円形導波管に容量性のインダクタンス素子として壁面から金属棒を挿入する構造が提案されているが、これもまた製作が困難であるため課題が残っている。さらに、等価的に負の誘電率を示す遮断周波数以下の TE モードと負の透磁率を示す遮断周波数以下の TM モードを利用した正方形導波管が提案されている。

伝送線路は線路としてだけでなく、放射するアンテナとして漏洩波アンテナとスロットアンテナについて述べる。通常の伝送線路において進行波アンテナは反射波のない進行波を利用して放射するアンテナであり、その一つである漏洩波アンテナは進行波の導波部で連続的または波長に比べ短い間隔で電磁波を外部に漏洩して放射するアンテナである。方形導波管はレーダに利用されて、外導体に穴を開けた漏れ同軸ケーブルは地下鉄などのトンネルの通信用に利用されている。金属導体だけでなく平面回路で構成される線路からも漏洩現象が確認されており、媒質中の位相速度が空間のそれよりも大きくなる速波領域で波は空間に放射される。これを利用してビーム走査漏洩波アンテナが提案されている。スロットアンテナは導体面上に空けたスロットを放射素子として用いるアンテナである。導波管壁面にスロットを切った導波管スロットアンテナがあり、衛星放送送受信用としてラジアルラインスロットアンテナが考案されている。これらの漏洩現象を利用したアンテナは上記した通り、電磁メタマテリアルの応用により後退波をアンテナに利用することで後方から前方へのビーム走査や基地局アンテナとして使用するビームチルトが期待されている。ビーム走査を考えた場合、右手系領域と左手系領域との間に阻止帯域がなく連続的に周波数操作ができることが望ましく、また広帯域で損失が少ないアンテナが期待されている。

本論文では、遮断周波数以下の TE・TM モードを利用した右手/左手系複合円筒導波管および方形導波管を提案する。提案する導波管の構成材料は誘電体を用いないことで損失をできる限り

なくしている。円筒導波管においては遮断周波数以下の TM モードと導体隔壁により扇型導波管を構成することで TE モードを発生させる。また、方形導波管においては TE モードを発生させるために H 型導体隔壁板を装荷する。提案する両導波管は両モードをもつ導波管を交互に接続することで左手系伝送線路を実現する。また、両モードの遮断周波数を一致させ阻止帯域のないバランス条件を満たす導波管を導体隔壁の寸法を調整することで、あるいは各モードの遮断導波管の区間の長さを調整することで実現できることを明らかにしている。さらに、この提案した CRLH 導波管にスリットまたはスロットを設けることで構成された導波管型漏洩波アンテナの放射特性について述べている。最後に、実際に CRLH 導波管を試作し解析結果と実験結果の比較を行うことで、CRLH 方形・円筒導波管の構成法の有用性を明らかにする。

このように、CRLH 円筒および方形導波管を新たに開発し、それらの導波管設計法を示すとともに、伝搬特性と放射特性の理論的、実験的検討の研究成果をまとめたものが本論文である。