

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 23 日現在

機関番号：34310

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23560421

研究課題名(和文) 伝搬特性を制御する右手系人工媒質の開発と放射素子への応用に関する研究

研究課題名(英文) Study on artificial materials with right handed nature for controlling propagation behavior and application to radiating elements

研究代表者

出口 博之 (DEGUCHI, HIROYUKI)

同志社大学・理工学部・教授

研究者番号：80329953

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：新たな右手系人工媒質を得るため、開口結合パッチを基にした透過素子を提案し、素子形状ならびに多層構造の最適化によって良好な周波数特性が得られることを実証している。また、複数凸型共振素子を用いた直交偏波共用反射素子についても新たな提案を行い、複数の共振現象を最適化することによって人工媒質の広帯域化が行えることを明らかにしている。このような検討は直線偏波だけでなく円偏波アンテナについても行い、人工媒質の多機能化を図っている。さらに、人工表面媒質の一次放射計系への応用についても検討を加え、これら開発した人工媒質ならびにアンテナの性能は、数値的・実験的検証により確認している。

研究成果の概要(英文)：Transmission elements based on aperture-coupled-patch FSSs have been proposed for obtaining novel artificial materials with right-handed nature. Both the element shape and the multi-layer structure are optimized to improve the frequency response. The proposed artificial elements are applied to design of flat lenses. Reflection elements with multiple convex resonant-strips have been also proposed for dual-polarization use. The shape optimization to control multiple resonance behaviors has been performed for achieving low cross-polarization characteristics. The proposed artificial elements are applied to design of aperture antennas with both linear and circular polarization. Primary radiators with artificial impedance surfaces have been developed and applied to a backfire primary radiator for rotational symmetric reflector. The performance of the developed artificial materials and antennas are confirmed numerically and experimentally.

研究分野：アンテナ工学，電磁界理論，マイクロ波工学

キーワード：マイクロ波 伝搬特性 放射素子 周期構造 ミリ波 最適化 高次モード

1. 研究開始当初の背景

電力・通信インフラシステムにおいて、ワイヤレス電力・情報伝送を達成するため、IT技術を駆使した高度なシステム制御技術が検討されている。中でもワイヤレス通信技術においては、新たな機能や性能向上のために電磁メタ材料が注目されており、回路素子や放射素子への応用が期待されている。電磁メタ材料の研究の多くは、負屈折率等の媒質を扱うものであるが、主として1次元周期構造の分散特性の問題として検討され、回路素子としては左手系伝送線路、放射素子としては線状の漏洩波アンテナが提案されている。しかしながら、現状では、狭帯域でしかも損失が大きく、満足のいく性能が得られているとは言い難い。また、マッシュルーム状の単位セルを2次元配列したものについては表面波に対する振る舞いを制御する検討が行われている。一部にこれをインピーダンス境界面として応用する試みがあるが、周波数特性が急峻に変化してしまい、制御が難しいという問題がある。このようにこれまで提案されてきた代表的な電磁メタ材料は、様々な形式のマイクロ波・ミリ波回路・放射素子への応用は容易ではない。一方、電磁メタ材料とは異なる右手系人工媒質では、広帯域な周波数範囲における動作が期待でき、本研究ではこのような媒質を対象として研究を行い、新たなマイクロ波回路素子ならびに放射系への応用を試み、最適化によって高性能な装置を開発していく。

2. 研究の目的

近年注目されている左手系媒質は、損失が大きいことや周波数帯域が狭いこと等、実用化にはまだ不十分な点が多い。これに対して、実効的な屈折率を正の値に限った人工的な右手系媒質では、屈折率を任意に実現することが比較的容易になり、自在に透過波や反射波の制御が行える可能性がある。そして、このような媒質を開発できれば、新たなマイクロ波・ミリ波回路および放射素子の設計は充分期待できる。そこで本課題は、2次元および3次元人工媒質の提案を行うとともに、これを応用して新たな空間フィルタ、空間ポラライザ、薄型レンズ等の伝搬特性を巧みに制御したマイクロ波・ミリ波素子を研究しようというものである。そのため、平面素子の2次元配列の多層構造ならびに3次元周期配列の構造を取り上げ、高速化を図ったモーメント法を基に、マイクロ波・ミリ波領域で動作する単位セル形状について詳細な検討を行い、右手系人工媒質の最適化設計を行っていく。そして、平面回路技術による人工媒質の設計・試作によって実用化を目指した研究を行っていく。

3. 研究の方法

(1) 単位セル形状として、平面導体素子および平面スロット素子を多層配置した構造を

考え、これらの素子の共振・非共振現象を利用していく。まず単純な素子形状に対して結合共振現象を詳細に検討し、伝搬特性の基本的な振る舞いを明らかにしていく。そして、複雑な単位セル構造へと発展させていくが、その場合、電流分布を展開する基底関数の数は極めて膨大なものとなることが予想され、計算時間が問題となってくる。そこで、モーメント法を用いた最適化計算においては、そのインピーダンス行列要素を、最適化を行う前に予め計算処理しておき、膨大な数の単位セル形状に対する計算全体の高速化を図っていく。また、このインピーダンス行列要素の値は共振現象に依らず緩やかな変化となることはわかっており、マイクロ波・ミリ波さらには光領域にわたる広範囲な周波数特性の解析や設計にあたっては、離散的なインピーダンス行列要素値を基に内挿することによって更なる高速化を図るとともに、超広帯域な周波数範囲における人工媒質の基礎的検討も行っていく。

(2) 人工媒質を利用した空間的な電波伝搬制御素子としてホーンアンテナを取り上げ詳細な検討を加える。ホーンの電磁界解析にあたっては、階段状の形状にモデル化し、一つのステップ状不連続部について断面形状の等しい導波管モードで展開し、横断面内電磁界分布の連続条件を満足するよう定式化して全ての不連続部に対して数値解析を行い、これらを伝送線路理論によって縦続接続していく。このとき、ホーンを半径方向に等間隔で分割し、不連続部形状を変えず、2つの不連続部をつなぐ軸方向の長さだけを変化させることによって様々な形状をモデル化すれば、最適化において繰り返し行われるホーンの数値解析時間を大幅に短縮することができる。これによって、ホーンの壁面構造を、モーメント法やモード整合法を基にした最適化によって設計し、高性能化を図っていく。

(3) 人工媒質の基本構造となる単位セルとして、3次元構造を検討するため、3次元周期グリーン関数を基にしたモーメント法の解析を用い、最適化設計を行っていく。その際、計算の高速化は重要な課題であり、モーメント法を基にした高速電磁界解析や、多目的最適化手法を取り入れ、単位セル形状の修整を試みる。さらに、人工媒質は実際には有限の大きさとなることから、媒質終端の境界条件を考慮した有限周期構造のモーメント法解析によっても検討を加えていく。また、新たに表面波を励振する給電構造についても一つの提案を行う。

(4) 屈折率の値に応じて異なる形状の単位セルを3次元配列することによって、高周波近似のもとでレンズ媒質を設計していく。また、屈折率分布を2次元分布に限り、例えば開口

面に平行な面で分布をもたせ、垂直な方向で同様としたものを新たなレンズ媒質として提案する。このような人工媒質の構造としては、開口面に平行な面内で異なる形状の単位セルが配列され、これを垂直方向に周期配列したものとなる。この場合には、モーメント法によって垂直方向単位構造に対する一般化散乱行列を求め、縦続接続等の解析によって特性評価することができる。また、周波数選択膜として設計すれば、多周波数共用化も行え、汎用的な基本素子となり得る。さらに、実効的な誘電率空間分布を制御した薄型平面レンズを設計試作して評価し、得られた結果をとりまとめ、成果の発表を行う。

4. 研究成果

(1) 地導体にエルサレムクロス型スロット素子を設け、その両面の誘電体基板にパッチ素子を2次元配列した新しい薄型構造の右手系人工媒質を検討した。従来のアレーアンテナや周波数選択膜の考え方を応用した平面レンズの設計では、誘電体基板の厚みを一定としたときの移相量の制御が難しいという問題があったが、本研究では、エルサレムクロス型スロットならびにパッチ素子を透過媒質の単位構造素子として用い、これらの共振特性に加えて、リアクタンス成分も制御することによって所定の結合共振特性を実現している。まず、簡単のため、エルサレムクロス型スロットは、単一偏波に対して動作するように設計するものとし、共振スロットとリアクタンス・スロットを一つにまとめた新しい機能を有するスロット素子を考案している。このような構造で得られる結合共振特性より広帯域な通過域特性を実現することによって、広範囲な透過位相の制御を可能にしている。得られた単位素子は、従来のものに比べて小さくできることも一つの特徴である。このような素子を2次元周期配列した構造に対して電磁界解析を行い、透過特性を評価することによって提案する右手系人工媒質の妥当性を検証している。そして、単位素子の形状を拡大、縮小すれば透過位相を任意に制御するとともに反射電力を抑えた人工媒質の設計が行える。また、伝搬方向の媒質の厚みを非常に薄くすることができるので、マイクロ波帯の薄型平面レンズへの応用が可能である。さらに、このような検討結果を基に一次ホーンと平面レンズからなるアンテナを設計し、放射特性を数値的に評価した結果、良好な特性が得られており、放射素子への応用についても一つの成果が得られている。

(2) 高利得・低サイドローブ特性をもつ反射鏡アンテナの小型化を達成するため、副反射鏡として、通常の2次曲面の鏡面系のかわりに、反射鏡表面を人工表面媒質で構成した一次放射系を考え、軽量化も考慮して誘電体基板とその表面に同心円状の導体膜をつけた

構造について検討した。提案する一次放射器は、中央には給電導波管から誘電体基板内への直接波を遮へいする導体膜を設けた構造となっており、表面波の抑圧ならびに給電系との整合が可能なものとなっている。そして、反射鏡表面を電氣的にTE波に対しては完全磁気導体(PMC)、TM波に対しては完全電気導体(PEC)にすることによって、効率よく主反射鏡に吹き付けて高能率化し、さらに副反射鏡表面に沿って伝搬する表面波を抑圧して後方散乱を抑えることでアンテナ2次放射パターンのサイドローブレベルの低減を図っている。設計した一次放射器について電磁界数値シミュレーションにより特性計算を行ったところ、従来のものに比べて放射特性の改善が見られた。また、主反射鏡表面に用いる人工表面媒質として、異なる共振現象と偏波特性を巧みに利用した直交偏波共用リフレクタレーについて検討を加えた。アレー素子(単位セル)は4つの共振素子から構成され、2段凸型ストリップ導体を変形したもの、ならびに凸型S状ストリップ導体から構成した素子形状について各々提案し、特性評価を行った。その結果、前者は交差偏波特性の低減に有効であり、一方後者は、さらに広帯域化を達成するために有用であることを数値的・実験的評価によって明らかにした。

(3) 所望のアンテナ開口面分布が得られる伝搬特性の制御を平板構造の開口面によって行うため、周波数選択膜(FSS)の単位セル形状を応用して、少しずつ異なる形状にしたものを2次元配列させた人工媒質を検討した。このような構造に対する伝送特性の合成法として、周期配列したときに規格化した帯域通過特性を実現するように単位セル形状を決定し、これら一つずつ配列して2次元アレーを構成することによって伝送波の開口面振幅および位相分布の制御を行う方法を提案している。さらに、多層構造の人工媒質に適した構造として、クロススロットを多層化して隣接層間の結合共振を利用した人工媒質を考案している。設計例として5層構造の人工媒質について示し、電磁界解析によって伝送特性ならびにアンテナの放射特性の評価を行い、提案構造の妥当性を検証している。また、アンテナへの応用例として、広帯域モノポールアンテナ背面に人工表面媒質を設けた構造の特性について検討した。給電線路として用いているコプレナー線路と、その背面のマイクロストリップ導体素子の2次元アレー面とを一体にした多層化した構造を提案し、給電線路に対してはインピーダンス境界面として動作させ、アンテナに対しては入力インピーダンスの広帯域な制御を試み、電磁波論的な取り扱いを基にした設計解析を行っている。このような検討結果を基にして提案する人工表面媒質を備えたモノポールアンテナを設計し、試作実験ならび

に数値計算の両面から提案するアンテナの有効性を検証している。

(4) 人工表面媒質の高性能化を達成するため、広帯域に動作する直交直線偏波共用素子ならびに偏波変換特性をもたせた円偏波発生素子を各々開発している。まずマイクロストリップ素子による主偏波および交差偏波成分の周波数特性について、周期境界条件を用いたスペクトル領域モーメント法による厳密な解析を行い、ストリップ導体素子に誘起される電流分布の振舞いを詳細に検討している。ここでは、素子の対称性ではなく、単位セル構造および配列に対称性をもたせることによって交差偏波成分の低減を試みた。ここでは、これを実現する単位セルとして、2つの対称なスプリット方形リング素子からなるサブセルを提案し、直交する2軸に対して対称に4つ配置した新たな構造を考案している。これによれば、複数共振特性によって広帯域化が行えるとともに、サブセルの主偏波成分を全て同相、交差偏波成分を互いに逆相とすることができ良好な偏波特性が実現できる。このような研究成果は、右手系人工媒質の設計ならびに高性能な平面アンテナを開発する上で非常に有用なものとなる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計8件)

D. Higashi, H. Deguchi, M. Tsuji, Low cross-polarization reflectarray elements with four axial symmetry for dual-polarization use, IEICE Communications Express, 査読有, Vol.4, No.3, 2014, pp.85-88.

DOI: 10.1587/comex.4.85

D. Higashi, H. Deguchi, M. Tsuji, Reflectarray elements with low cross polarization for dual-polarization and wideband use, IEEE International Workshop on Electromagnetics Proceedings, 査読有, Vol.1, 2014, pp.6-7.

DOI: 10.1109/iWEM.2014.6963608

D. Higashi, H. Deguchi, M. Tsuji, Omega-shaped resonant elements for dual-polarization and wideband reflectarray, IEEE/AP-S Antennas Propagat. Symp. Proceedings, 査読有, Vol.1, 2014, pp.809-810.

DOI: 10.1109/APS.2014.6904733

T. Toyoda, D. Higashi, H. Deguchi, M. Tsuji, Broadband reflectarray with convex strip elements for dual-polarization use, Proceedings of 2013 International Symposium on Electromagnetic Theory, 査読有, Vol.1,

2013, pp. 683-686.

H. Deguchi, M. Tsuji, A. Kobayashi, A. Omori, Lens-corrected coaxial-groove horn for illuminating ultra wide area, Proceedings of International Symposium on Antennas and Propagation, 査読有, Vol.1, 2012, pp.1267-1270.

Y. Wang, H. Deguchi, M. Tsuji, Flat lens based on aperture-coupled-patch FSS with four-pole resonance behavior, IEEE/AP-S Antennas Propagat. Symp. Proceedings, 査読有, Vol.1, 2012, pp.1-2.

DOI: 10.1109/APS.2012.6348717

Y. Wang, H. Deguchi, M. Tsuji, Flat lens based on aperture-coupled-patch FSS with four-pole resonance behavior, Proceedings of Progress In Electromagnetics Research Symposium, 査読有, Vol.1, 2012, pp.1753-1756.

S. Yamamoto, H. Deguchi, M. Tsuj, Compact groove-loaded rectangular horn with elliptical beam for orthogonal polarization use, IEEE/AP-S Antennas Propagat. Symp. Proceedings, 査読有, Vol.1, 2011, pp.3323-3326.

DOI: 10.1109/APS.2011.6058694

〔学会発表〕(計11件)

東 大智, 出口 博之, 辻 幹男, 直線 - 円偏波変換特性を有するリフレクタレー共振素子, 2015 信学会総合大会, B-1-95, 2015年3月12日, 立命館大学(滋賀県草津市).

東 大智, 出口 博之, 辻 幹男, 低交差偏波特性を有する直交偏波共用リフレクタレーのための4軸対称共振素子について, 電気学会電磁界理論研究会, EMT-14-158, pp. 59-64, 2014年11月21日, 草津温泉中沢ヴィレッジ(群馬県吾妻郡草津町).

東 大智, 出口 博之, 辻 幹男, 広帯域直交偏波共用リフレクタレーのための4軸対称共振素子, 2014 信学会ソサイエティ大会, B-1-65, 2014年9月24日, 徳島大学(徳島市).

豊田 翔平, 出口 博之, 辻 幹男, リフレクタレーを用いた平面アンテナの広帯域低姿勢化について, 輻射科学研究会, RS-13-11, 2013年12月20日, 同志社

大学（京都府京田辺市）。
東 大智, 出口 博之, 辻 幹男, 直交偏波
共用リフレクタレーに用いる広帯域 4
共振素子に関する検討, 輻射科学研究会,
RS-13-10, 2013 年 12 月 20 日, 同志社
大学（京都府京田辺市）。

東 大智, 出口 博之, 辻 幹男, 広帯域直
交偏波共用リフレクタレーのための Ω
型共振素子, 2013 信学会ソサイエティ大
会, B-1-123, 2013 年 9 月 19 日, 福岡
工業大学（福岡県福岡市）。

王 瑜, 城戸 晶史, 出口 博之, 辻 幹男,
スロット結合パッチ FSS を用いた平面
レンズアンテナ, 電気学会電磁界理論研
究会, EMT-12-157, pp. 37-42, 2012 年
11 月 16 日, 阿蘇プラザホテル（熊本県
阿蘇市）。

豊田 鷹史, 出口 博之, 辻 幹男, 直交偏
波共用リフレクタレーの広帯域化のた
めの素子形状について, 電気学会電磁界
理論研究会資料, EMT-12-158, pp. 43-48
2012 年 11 月 16 日, 阿蘇プラザホテル（熊
本県阿蘇市）。

豊田 鷹史, 出口 博之, 辻 幹男, 2 共振
素子で構成した直交偏波共用リフレク
トアレーの広帯域化, 2012 信学会ソサイ
エティ大会, B-1-96, 2012 年 9 月 13 日,
富山大学（富山県富山市）。

王 瑜, 城戸 晶史, 出口 博之, 辻 幹男,
4 共振特性を持つスロット結合パッチ
アレーによる平面レンズアンテナ, 2012 信
学会ソサイエティ大会, B-1-106, 2012
年 9 月 13 日, 富山大学（富山県富山市）。

青木 祐樹, 出口 博之, 辻 幹男, GA に
より最適化された任意形状素子で構成す
るリフレクタレー - 対称面を有する
場合 -, 電気学会電磁界理論研究会,
EMT-11-125, pp.111-115, 2011 年 11 月
17 日, コンベンションホール立山（富山
県高岡市）。

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

https://www1.doshisha.ac.jp/~hdeguchi/h_research.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

出口 博之 (DEGUCHI, Hiroyuki)
同志社大学・理工学部・教授
研究者番号: 80329953

(2) 研究分担者
なし

(3) 連携研究者
なし