



## < 研究紹介・自己紹介 >

研究項目 A01 計画研究ア

「周期構造を利用したマイクロ波メタマテリアルの開発と応用」

研究分担者 上田 哲也 (京都工芸繊維大学)

計画研究ア「周期構造を利用したマイクロ波メタマテリアルの開発と応用」の研究分担者で京都工芸繊維大学の上田と申します。自己紹介の代わりと致しまして、これまでの研究経緯、最近の研究内容を紹介させていただきます。

博士課程修了後、現在の職場に着任して以来、早 15 年が経とうとしておりますが、当時教授であった堤誠先生の研究室で、絶縁性磁性体薄膜に沿って伝搬するスピン波の一種である静磁波の非線形波動伝搬とその工学的応用に関する理論的・実験的研究に携わっておりました。光の分野ではよく知られた、いわゆる包絡線ソリトンがマイクロ波領域で、しかも数ミリ～十数ミリ程度の短い伝搬距離で生じるというものです。摂動法による非線形波動伝搬の理論解析、数値解析法の構築、あるいはパルス圧縮の電力依存性などを実験的に調べたりしておりました。ちょうどその頃の 2002 年は、伝送線路の概念をベースとしたメタマテリアルが提案された時期でもあり、興味津々にメタマテリアルに関する論文を調べていたときに、これから何か大きなことが始まりそうな予感がしたのを覚えています。メタマテリアルにおいて負屈折率を引き起こすためには負誘電率および負透磁率の組み合わせが必要ですが、当時研究対象として扱っていたフェライトが負の透磁率をもつ材料であったのがきっかけで、本格的にメタマテリアルの研究に取り組み始めました。2004 年には、左手系伝送線路を構成する従来の誘電体基板の代わりにフェライト基板を用いて、非可逆性を有する左手系線路を最初に提案しました。順方向伝搬においては負誘電率および負透磁率により左手系導波モードが、逆方向伝搬においては負透磁率のシングルネガティブ状態で減衰モードが主モードとなり、透過係数の大きさに非可逆性の現れる構造が実現できました。しかしながら、この構造はフェライト媒質の負透磁率を利用するために、動作周波数が強磁性共鳴周波数付近に設定され、磁気損失により、伝送損が非常に大きくなってしまいう問題がありました。

その後、文科省の海外先進研究実践支援プログラムの援助のもとで、2005 年から 11 ヶ月間、メタマテリアルの研究分野で第一人者である UCLA の伊藤龍男先生の研究室で誘電体を用いたメタマテリアルに関する研究に取り組む貴重



な機会を得ました。当時、誘電体を用いた左手系メタマテリアル構造の構成方法としては、主に欧米の他の研究グループからの 2 つの提案が良く知られていました。そのうちの一つは 2 種類の誘電体球の共振状態を、それぞれ単振動電気双極子、磁気双極子と見なして、全体構造の実効誘電率および透磁率を操作し、ダブルネガティブにすることができるというものでした。もう一つの構成方法は、1 種類の誘電体共振器が共振状態で、単振動磁気双極子のように振舞い、しかもその共振器間の磁気相互結合が強いと、バックワード波伝搬が可能になるというものでした。いずれも金属を全く用いない構成法であり、導体損をなくすることができる点で大変興味深い構造でしたが、前者の 2 種類の誘電体共振器構造は、等方性 3 次元メタマテリアルが作成しやすい反面、高い Q 値の共振器からなり、分散性が強く動作帯域が非常に狭い問題がありました。また、高い製作精度を要し、実験での動作確認が難しそうで、当時まだ実験報告例がありませんでした。一方、共振器間の相互結合を用いる構成は、広帯域動作が可能であるものの、3 次元構造への拡張が容易でなく、またバックワード波だけでなくフォワード波も伝搬するマルチモード伝搬になりやすい問題がありました。従って、どうにかして不要な伝搬モードを遮断し、所望の左手系モードをシングルモードとして伝搬させられないものかと思案していました。誘電体共振器を取り囲む構造として、誘電体共振器が共振して実効透磁率が負となる場合に限って導波状態となり、それ以外の場合は遮断状態となっていることが望ましいと考えました。そのためには、誘電体の共振状態に影響を受けずに背景媒質の誘電率が負となることを保証する必要がありました。そこで、誘電体だけからなるメタマテリアル構造にはこだわらず、金属を部分的に用いたハイブリッド構造を採用することを考えました。動作原理は、一次元構造で言えばマイクロ波帯の誘電体フィルタでよく用いられるカットオフ導波管と同じであり、カットオフ領域の TE モードの実効誘電率が負となることを積極的に利用したものです。結果として思いついたのが、2 次元正方格子に誘電体共振器を配置した構造を平行平板線路内に挿入した 2 次元左手系メタマテリアル構造であり、TE 波入射に対して負屈折率を示すことが、数値計算および実験的にも確認されています (図 1 参照) [1]。

その後帰国してから現在まで、誘電体共振器を用いたメタマテリアルと、以前より取り組んでいた磁性体によるメタマテリアルの 2 本立てで研究を進めています。誘電体共振器を用いたメタマテリアルに関しては、作製の容易な 3 次元構造を実現する方法の一つとして、誘電体共振器を含む誘電体層と、金属板に穴の開いたメッシュ板との繰り返しによる積層構造を採用し、同構造が積層面に平行な 2 次元の伝搬方向だけでなく、垂直伝搬に対しても負屈折率を示す 3 次元負屈折率構造となることを理論的、実験的に示しました (図 2 参照) [2]。

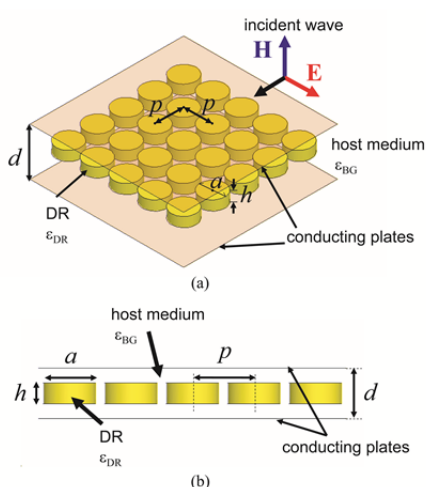


図1 誘電体共振器の 2 次元正方形格子構造が平行平板に挿入された 2 次元左手系メタマテリアル構造. 文献[1]参照.

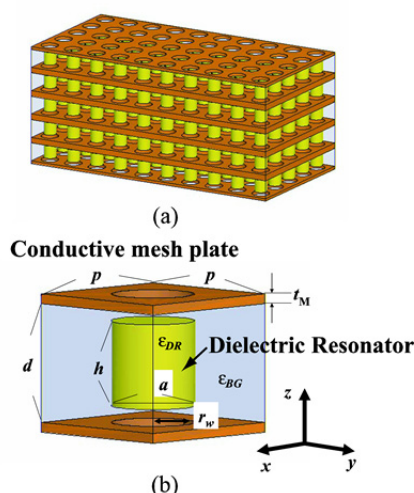


図2 誘電体共振器を含む誘電体層と金属メッシュ板の繰り返し積層構造による3次元右手/左手系複合メタマテリアル構造. 文献[2]参照.

この構造は本質的に偏波依存性があり、一軸異方性も大きく現れますが、偏波が積層面に平行となる条件のもとでは、分散関係だけでなく、波動インピーダンスもほぼ等方性を示すような構造設計ができることを最近報告しております。

一方、磁性体を用いた非可逆メタマテリアルに関しては、研究開始当初より、信号通過/遮断を意味する透過係数の大きさに現れる非可逆性のみを扱っておりましたが、あるとき、メタマテリアルのもつ固有の特徴はフォワード波/バックワード波、右手系/左手系、負屈折率、クローキング等の用語にも見られるように、伝搬する電磁波の位相特性が重要な役割を果たしていることに気づきました。そこで、位相特性に注目した新しい非可逆メタマテリアルとして、

順方向伝搬は正屈折率，逆方向は負屈折率を示す非可逆メタマテリアルを等価回路モデルにより表現し，具体的な1次元構造も提案しました<sup>[3]</sup>．このような特殊な非可逆伝搬特性を満足する場合，伝送電力方向の選択に関係なく，波数ベクトルが同じ方向を向きます．特に波数ベクトルの大きさも同じになる場合，有限長線路に両端短絡もしくは両端開放の条件を課すと，線路長に依らず同じ周波数で自動的に共振条件を満たします．この場合の共振器の電磁界分布は，振幅が一様で，位相は勾配を持っていることから，進行波共振器のそれとほぼ同じになります（図3参照）．しかしながら，共振器サイズが共振周波数に関係なく自由に変えられることと，共振器上の伝送電力の向きが多重反射で相殺されている点が，従来の進行波共振器とは大きく異なる特徴です．我々はこのような共振器を「擬似進行波共振器」と呼んでいます<sup>[4]</sup>．最近ではこの共振器の位相勾配を変化させることにより，ビーム走査可能なアンテナに関する研究も行っています<sup>[5]</sup>．

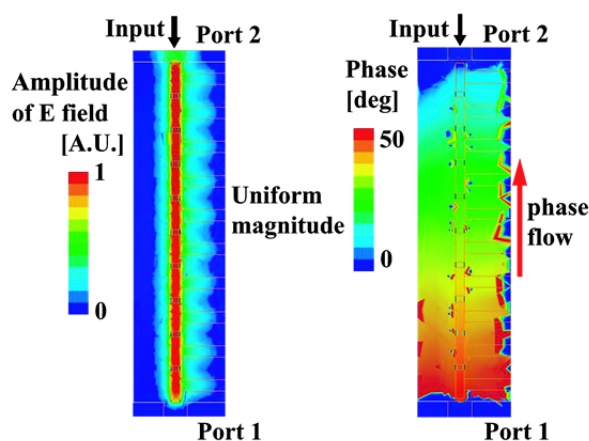


図3 擬似進行波共振器の電磁界分布. (a) 振幅分布. (b) 位相分布. 文献[4]参照.

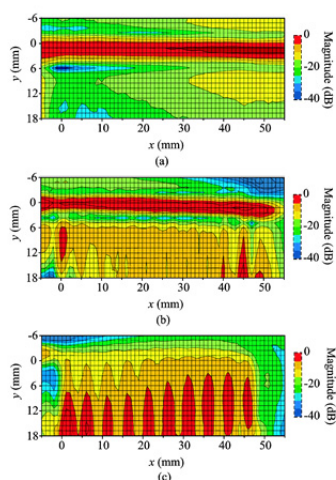


図4 終端条件を変えることによる0次共振器の電流分布の変化の様子. 文献[6], [8]参照.

また，0次共振器のアンテナ応用に関する研究も行っています．この0次共振器は，計画研究アの研究代表者である山口大学の真田篤志先生がUCLAの伊藤先生のグループのもとで研究されていたときの大きな成果の一つであり，共振器上の電磁界分布において振幅，位相分布ともに一様となるものです．我々は，最近この共振器の終端条件の一般化を行い，これまでに報告されていた両端短絡および両端開放の場合だけでなく，両端のリアクタンスが互いに複素共役の関係となる場合にも，共振条件を満たすことを示しました<sup>[6]</sup>．その結果，実効透磁率が0の場合に相当する伝送線路の直列枝の直列共振と，実効誘電率が0の



場合に相当するシャント枝の並列共振に対して、それぞれのエネルギーの重み付けを両端条件だけで自由に変えることができるようになりました。応用例として、共振器の両端条件を変えるだけで、偏波回転制御を可能とするアンテナが構成できることを最近提案しています[7]。

最後に、私がメタマテリアルに取り組み始めてからもうすぐ10年が経とうとしております。そろそろ出口として、メタマテリアル応用のターゲットをしっかりと定める時期に来ているので、メタマテリアルに基づく新機能デバイス、新しい応用例をどんどん提案したいと考えております。今後ともよろしくご厚意申し上げます。

- [1] T. Ueda, A. Lai, T. Itoh, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 55, 1280, 2007.
- [2] T. Ueda, N. Michishita, M. Akiyama, and T. Itoh, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 58, 1766, 2010.
- [3] T. Ueda, K. Horikawa, M. Akiyama, M. Tsutsumi, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 57, 1995, 2009.
- [4] T. Ueda and H. Kishimoto, *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.* pp. 41-44, 2010.
- [5] T. Ueda, S. Yamamoto, Y. Kado, *IEEE Int. Symp. Antennas Propag. Proc.* pp. 1058-1061, 2011.
- [6] T. Ueda, G. Haida, T. Itoh, *IEEE Trans. Microw Theory Tech.*, 59, 612, 2011.
- [7] T. Ueda, G. Haida, Y. Kado, Itoh, *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.* TU2F-2, pp. 1-4, 2011.
- [8] T. Ueda and T. Itoh, “Composite right/left handed transmission lines and their RF applications,” Chapter 9, *Passive RF Component Technology: Materials, Techniques, and Applications*, edited by G. Wang and B. Pan, pp. 187-231, Artech House 2012.