

## 誘電体共振器による左手系メタマテリアル

上田 哲也\*・道下 尚文\*\*,\* \*\*・Tatsuo ITOH\*\*

### Dielectric-Resonator-Based Left-Handed Metamaterials

Tetsuya UEDA\*, Naobumi MICHISHITA\*\*,\* \*\* and Tatsuo ITOH\*\*

We report our recent work on left-handed metamaterial (LHM) structures using dielectric resonators (DRs). First of all, several types of DR-based LHM structures are reviewed. To achieve negative effective permeability, structural dispersions for DR arrays under the TE-resonance are utilized. For the left-handedness to be achieved with the TE-resonant DRs, designing of negative effective permittivity is essential and realized 1) by a magnetically mutual coupling between DRs, and 2) by a host medium with negative permittivity. As a host medium with negative permittivity, a cut-off parallel plate waveguide is utilized in the microwave and millimeter wave regions, and plasmonic metals are employed at optical frequencies.

**Key words:** negative-refractive-index metamaterials, dielectric resonators, left-handed metamaterials

左手系メタマテリアル構造 (left-handed metamaterial structures) に関する研究が、平板型スーパーレンズ、近接場イメージング、アンテナ等への応用を目的として活発に行われている。左手系メタマテリアル構造は、実効誘電率および透磁率が同時に負であり、後退波伝搬を可能とする構造のことである。最近、損失低減の観点から、誘電体共振器を用いた左手系メタマテリアル構造がすでにいくつか提案されている。このうち代表的な構成方法のひとつとしては、TE および TM 共振モードにある 2 種類の誘電体共振器群を用いる構成方法が挙げられる<sup>1,2)</sup>。TE および TM 共振状態にある誘電体共振器群は、共振周波数付近で大きな構造分散を示し、図 1 に示すように、共振周波数の上側でそれぞれ負の実効透磁率および誘電率を示す<sup>3)</sup>。このように、誘電体共振器群の TE および TM 共振動作はそれぞれスプリットリング共振器および金属細線の役割に相当する。しかしながら、これらの TE および TM 共振の動作帯域 (特に TM 共振) が狭いため、製作誤差許容度の観点から、両者の動作周波数を合わせることに困難がある。もうひとつの構造は、単一誘電体共振器群とその間の相互結合を用いた構造が挙げられる<sup>4)</sup>。この構造は結

合を利用しているために、動作帯域が上記の 2 種類の誘電体共振器群の場合に比べて広がる。筆者らは、この構造による三次元左手系メタマテリアル構造としての可能性を最近検討した<sup>5)</sup>。しかしながら、同構造の伝搬特性は結晶構造の配置に非常に影響を受けやすいという問題があることがわかった。筆者らは最近、別の構成方法として負誘電率をもつ背景媒質中に置かれた単一誘電体共振器群からなる構造を提案し、その動作を理論的、実験的に実証した。マイクロ波領域においては、方形導波管や平行平板における TE モードがカットオフ周波数領域において、実効誘電率が負となることが知られている<sup>6)</sup>。これまでに、誘電体共振器が平行平板線路に挿入された一次元左手系伝送線路からの後退波放射<sup>7)</sup> および二次元左手系構造において三角プリズムを構成し、負屈折性を示すこと<sup>8,9)</sup> を理論的および実験的に実証した。また、光領域においては、負の誘電率をもつ背景媒質としては、金属プラズモンを用いることにより可能となる<sup>10)</sup>。このように、筆者らの提案した構造内には金属が含まれるが、共振部分が誘電体で構成されているため、導体損失は従来のスプリットリング共振器を用いた場合に比べてはるかに小さくなると期待できる。ま

\* 京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科 (〒606-8585 京都市左京区松ヶ崎御所海道町) E-mail: ueda@kit.ac.jp

\*\* Department of Electrical Engineering, University of California at Los Angeles (Los Angeles, CA90095, USA)

\*\*\* 防衛大学電気情報学群電気電子工学科 (〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20)

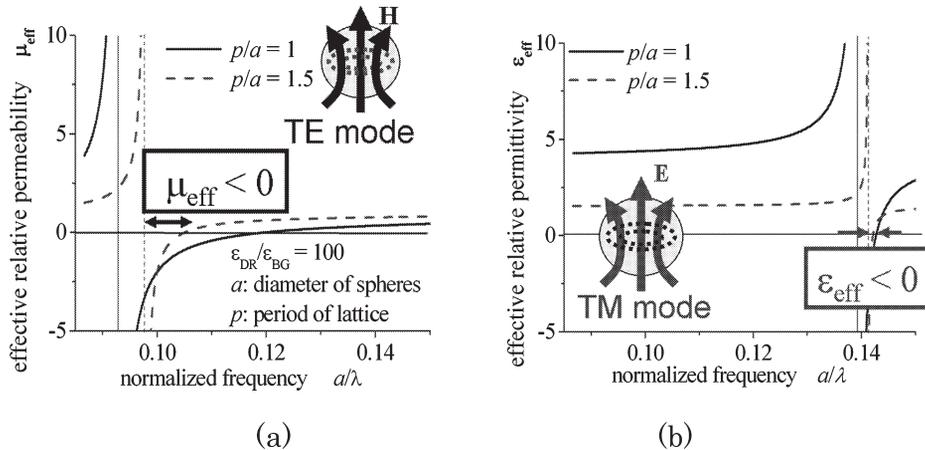


図1 誘電体球からなる三次元単純立方格子のもつ (a) TE 共振付近の実効透磁率および (b) TM 共振付近の実効誘電率.  $a$  は球の直径,  $p$  は周期を表す.

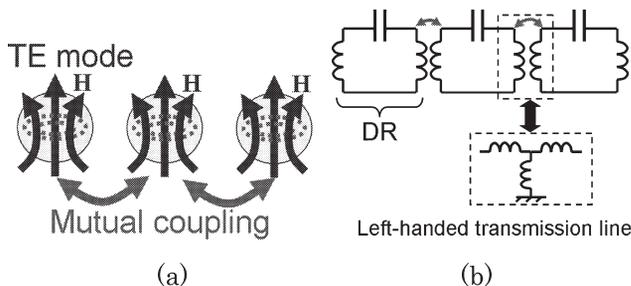


図2 単一誘電体共振器群とその相互結合による左手系構造の構成. (a) 一次元モデル, (b) 等価回路.

た, 負の誘電率をもつ背景媒質中に置かれた単一誘電体共振器群による左手系メタ材料の構成方法は, 誘電体共振器群の配列に周期性を要求しなくても, つまりアモルファスの配置によって, 等方性三次元左手系メタ材料構造が構成可能な点で期待できる.

### 1. 単一誘電体共振器群とその相互結合による構成<sup>4,5)</sup>

左手系伝送線路は, TE 共振にある誘電体共振器群とそれらの相互結合を利用して構成することが可能である. 共振器の簡単な等価回路モデルは, 図2に示されるように, 誘導素子と容量素子とからなる閉ループ回路を用いて表される. ここで, 共振器間は磁氣的に結合している. 誘電体共振器間の相互結合にある一次元配列は, 梯子形周期構造に置き換えることが可能で, 直列枝に直列共振器が, 並列枝に誘導素子が挿入された構造をとり, その結果として, 直列枝の共振周波数よりも低い帯域で左手系伝送線路として動作する. この考え方は, 二次元および三次元構造にも拡張することができる. 二次元構造は, 偏光方向を都合よく設定できるために, 伝搬方向に関係なく, 不要な相互結合を回避できるが<sup>4)</sup>, 三次元構造の場合, 伝搬方向および偏光方向のとり方によって, 望ましくない共振器間の結合

が避けられないため, 三次元構造の設計は二次元構造のそれに比べてかなり難しくなる. この望ましくない相互結合の結果として, 誘導性素子が並列枝に入るだけでなく, 直列枝にも入るため, 左手伝送線路を構成するうえで大きな妨げとなる. 以上のことから, 三次元結晶構造において, 任意方向に偏光され, 任意方向に伝搬する波の伝搬特性を調べる必要がある. 筆者らはこれまでに, TE 共振状態にある誘電体球からなるいくつかの結晶構造における伝搬特性を数値計算により調べている<sup>5)</sup>. 数値計算の結果, 結晶構造の選び方により, 波数領域の原点付近で比較的良好な等方性を示す周波数領域が存在するものの, 背景媒質が正の誘電率をもつことによる前進波の散乱, 多モードの問題が残されている. 以上のことからわかるように, 相互結合を用いた単一誘電体共振器群からなる構造は, 共振器の配置, すなわち結晶構造のとり方に大きく影響を受ける.

### 2. 負誘電率ホスト媒質中に置かれた単一誘電体共振器群からなる構成

左手系メタ材料構造は, TE 共振状態にある誘電体共振器群を負誘電率性ホスト媒質中に挿入することにより構成することが可能である. ここで左手系メタ材料を構成する場合に必要な条件となる負の実効誘電率は, このホスト媒質の誘電率自体により実現できる. その結果, 同構造のもつ伝搬特性は, 相互結合により構成される左手系メタ材料構造の場合に比べて, 共振器群の結晶構造のタイプにはほとんど依存しない. 以上のことから, 同構造は, 三次元等方性左手系メタ材料を構成する方法のひとつとして有望と考えられる. また, 同構造は, 誘電体共振器間の結合の大きさにかかわらず動作可能であることを強調しておく.

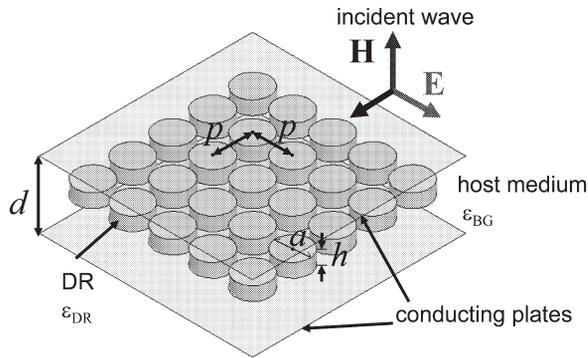


図3 単一誘電体共振器群が二次元負誘電率媒質中に配置された左手系メタマテリアル構造の構成 (文献10より抜粋).

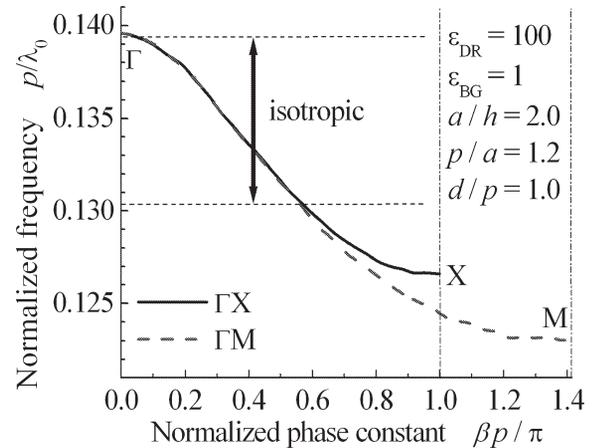


図4 二次元左手系構造の分散曲線.

## 2.1 マイクロ波・ミリ波領域<sup>7-9)</sup>

マイクロ波、ミリ波領域においては、金属は良導体として取り扱うことができる。この場合、方形導波管、もしくは平行平板線路に沿って伝搬するTEモードは、遮断周波数以下の帯域で実効誘電率が負となる<sup>6)</sup>。したがって、図3に示すようにカットオフ平行平板線路に誘電体共振器の配列を挿入し、DR列の巨視的振る舞いがTE共振時に負の実効透磁率を示すならば、誘電率および透磁率がともに負となる条件を満たすため、左手系メタマテリアルとしての動作が可能となる。同構造の一次元左手系伝送線路としての動作は、伝送線路に沿った位相分布を観察することにより数値的に確認され、伝送線路近傍に設けられた開放窓からの後退波放射特性により実験的にも確認されている<sup>7)</sup>。この構成は二次元構造への拡張が容易に可能であり、一例として二次元構造における分散曲線を図4に示す。この場合、平行平板線路の遮断周波数は共振器列が挿入されていない場合、平行平板間隔で決まり、 $(\epsilon_{BG})^{1/2}d/\lambda_0 = 0.5$ つまり $p/\lambda_0 = 0.5$ となる。その結果、同周波数下側において実効誘電率が負となりうる。一方、ディスク型誘電体共振器の基本共振モードはTE<sub>01δ</sub>モードであり、無限媒質中に1個置かれた場合の共振周波数は数値計算結果より $p/\lambda_0 = 0.123$ となり、同周波数近傍かつ上側領域において実効透磁率が負となりうる (実際には、高誘電率をもつ共振器が複数個存在するので、相互作用により誘電率の平均値は相対的に上昇し、その結果、実効透磁率に現れるTE<sub>01δ</sub>モードによる共振周波数はさらに若干下側に存在する)。図4をみると、実効誘電率と透磁率の両者の値が負となりうる領域において、左手系モードが存在し、等方性を示す周波数領域が動作周波数の8%程度となっていることが確認される。また、同様の原理に基づいて、左手系構造からなる三角プリズムを構成し、右手系メタマテリアルとの境界において負屈折率を示すことが、理論的および実

験的に確認されている<sup>8,9)</sup>。

## 2.2 光領域<sup>10)</sup>

光領域においては、金属媒質を用いて負の誘電率をもつホスト媒質を構成することが可能である。筆者らは、このような三次元構造を提案し、同構造において、伝搬方向、偏光方向に依存せず、等方性を有する左手型メタマテリアルの構成が可能であることをすでに数値的に実証している。また、この場合、誘電体球と金属ホスト媒質との境界において、表面プラズモンの発生がそれほど問題とならないことも確認している。

誘電体共振器を用いた左手系メタマテリアルについての最近の研究成果について報告した。特に、単一誘電体共振器群とその相互結合による左手系メタマテリアルの構成法、および負の誘電率をもつホスト媒質中に置かれた単一誘電体共振器群による構成法について述べた。

## 文 献

- 1) C. L. Holloway *et al.*: IEEE Trans. Antennas Propag., **51** (2003) 2596-2601.
- 2) O. G. Vendik *et al.*: Proc. of the 34th European Microwave Conference 2004 (2004) pp. 1209-1212.
- 3) L. Lewin: Proc. Inst. Elec. Eng., **94**, Part III (1947) 65-68.
- 4) E. A. Semouchkina *et al.*: IEEE Trans. Microwave Theory Tech., **53** (2005) 1477-1486.
- 5) T. Ueda *et al.*: URSI National Radio Science 2006 Meeting (2006) p. 51.
- 6) R. Marques *et al.*: Phys. Rev. Lett., **89** (2002) 183901.
- 7) T. Ueda *et al.*: 2006 Asia-Pacific Microwave Conference Proceeding, 2 (2006) pp. 1079-1082.
- 8) T. Ueda *et al.*: Proc. of the 36th European Microwave Conference 2006 (2006) pp. 435-438.
- 9) T. Ueda *et al.*: IEEE Trans. Microwave Theory Tech., **55** (2007) 1280-1287.
- 10) B.-J. Seo *et al.*: Appl. Phys. Lett., **88** (2006) 161122.

(2007年5月11日受理)