

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420341

研究課題名(和文) マイクロ波領域において比透磁率が1以下の構造の開発とその応用に関する研究

研究課題名(英文) A Development of mu nearly zero structure.

研究代表者

有馬 卓司 (Arima, Takuji)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20361743

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、マイクロ波領域において広帯域に比透磁率が1以下になる構造の開発に関する一連の研究を行った。まず、シミュレーション手法の開発を行った。開発した手法は等価回路を用いたもので、一般的に用いられる電磁界解析手法に比べ高速に解析できる、これにより高速にシミュレーションが可能となった。この手法を用いて広帯域に比透磁率が1以下になる構造の開発を行った。この構造は従来の構造に比べ数倍の帯域で比透磁率が1以下になることを確認した。この構造は、アンテナの小型化などに応用できる。

研究成果の概要(英文)：In this research, a new structure which realizes the relative permeability becomes 1 or less in the broadband in the microwave range is developed. First, we developed a simulation method. The developed method is based on the equivalent circuit and the method can be analyzed at a higher speed than the electromagnetic field analysis method that is generally used, which enables simulation at high speed. We developed a new structure with a relative magnetic permeability is less than 1 in a broadband frequency range. It was confirmed that this structure has relative magnetic permeability is less than 1 in a broadband frequency range. the bandwidth of the structure is almost doubled band compared to the conventional structure. This structure can be applied to miniaturization of antennas.

研究分野：電磁波工学

キーワード：メタマテリアル FDTD法 比透磁率の制御

### 1. 研究開始当初の背景

マイクロ波領域において、メタマテリアル技術が研究されている。メタマテリアルとは自然界には存在しない電気特性を示す構造の総称である。メタマテリアルの一種に、比誘電率 $\epsilon_r$ が1以下の媒質がある。これは図1に示す様な、同じ構造を周期的並べることで作製される。この特性を用いるとプラズモンと呼ばれる波長よりも小さな局所的な電界を作成できる事や、 $\epsilon_r$ が“0”付近の構造中にダイポールアンテナを埋め込むことで、薄型で超高利得なアンテナの製作が期待されるため、広く研究されている。他のメタマテリアルとして人工磁壁 (AMC: Artificial Magnetic Conductor) がある。AMCは電磁波を当てた時にその反射位相が $0^\circ$ となる。金属は電磁波が位相 $180^\circ$ の逆位相で反射され、金属近傍にアンテナを配置すると位相差から放射がキャンセルされ電磁波が放射されない。AMCは反射波が同位相のため、アンテナの利得を上げる効果があり、アンテナ工学マイクロ波工学の分野で広く研究されている。一方、 $\epsilon_r$ の効果により性能向上が可能なダイポールアンテナは一般的にその帯域が狭く用途に限られると考える。さらに、AMCを用いた利得向上手法は、AMCの表面とアンテナとの距離を0.03波長程度とできる。しかし、ごく近くに配置できるがそれでも0.03波長(1GHzで約9mm)程度は必要となり、またAMCはパッチアンテナを基に製作されるのでその周波数帯域は非常に狭い。

また、現在注目されているメタマテリアル技術の一つに、負の透磁率と負の誘電率を組み合わせる事により、負の屈折率を示す媒質を実現する技術がある。この技術を用いると、平面構造でレンズを構成することが出来るので、収差がなく完全レンズが実現でき、アンテナの給電系など様々な応用が期待されているが、現在出来ている構造はコンデンサ素子とコイル素子を組み合わせる事により回路網を形成する物で、その帯域は狭く、広帯域な負の屈折率を示す構造の開発が望まれている。ここでも、負の誘電率構造は広く研究されているが、負の透磁率を示す構造は広く研究されているとは言い難く実用化のネックになっていると考える。

以上より、研究代表者は $\mu_r$ が1以下を示す構造の設計および作製法が明らかになれば、広帯域特性を示すループ系のアンテナを $\mu_r$ が“0”付近の構造中に埋め込むことで、広帯域かつ小形薄型で高利得なアンテナの製作が出来、さらには比透磁率 $\mu_r$ が“-1”付近の構造を用いて完全レンズを模擬した電磁波の制御方法が実現できると考えた。

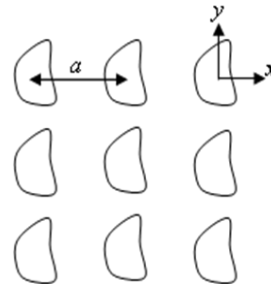


図1 本研究で用いる周期構造の例

### 2. 研究の目的

本研究では、マイクロ波領域において比透磁率 $\mu_r$ が1以下の構造を用いて、これまで出来なかった電磁波の制御法確立、アンテナの小型・高機能化を実現する一連の研究を行う。 $\mu_r$ が“0”付近の構造を用いる事により、薄く高利得なアンテナが実現出来ると考え、 $\mu_r$ が“-1”付近の構造と負の誘電率を示す構造を組み合わせ収差の無い完全レンズが実現できると考えられる。さらには $\mu_r$ が“-1以下”ではアンテナ等電磁波デバイス小形化への応用が考えられる。本研究では、実現のために、マイクロ波領域で広帯域・小形薄型かつ他構造の影響を受けずに使える $\mu_r$ が1以下構造の開発、開発した構造を用いて電磁波の制御方法およびアンテナ等への応用に取り組む。

### 3. 研究の方法

#### (1)比透磁率が1以下の構造に関する原理確立

本研究の核となる、比透磁率が1以下の構造に関する理論を完成させる。背景で述べたように研究代表者らは、これまで比透磁率を制御できる構造の開発を行ってきた。研究代表者らが提案している構造の比透磁率を決定する理論式を提案した。この理論式は信頼性のある式であるが、理論式より、この構造では帯域はある程度制限されることが分かった。ここでは、その式を見直すことによってより完全に透磁率をコントロールできる理論式を完成させる。具体的にはターゲットとするマイクロ波領域で、構造を回路的にコイルLとコンデンサCが複数個直列および並列で組み合わせさせていると考える。そしてこれらを、どのように組み合わせることで効率および精度よく、比透磁率をコントロールできるかを理論的に検討する。この作業には、数値解析を多用し、実際の構造がL,Cにどのように置き換わるかを調べる予定である。数値解析手法としてFDTD法を用いる。研究代表者はFDTD法に関して多くの研究業績があり熟練している。このため、シミュレーションはスムーズに進むと考えられる。調査および情報収集として、この分野をカバーする学

会としてはこの分野で国内最大規模の電子情報通信学会の研究会に参加する。

### (2)比透磁率 1 以下の構造開発

上記 3 (1)で明らかにした比透磁率が 1 以下の構造の動作原理をもとにそれを実現する構造の開発を行う。研究代表者らは、これまで実際にメタ材料の構造をいくつか提案してきた。本研究でもこの経験を生かし、論理式を実現する構造の開発を行う。ここでは、3 (1)で得られた成果を基に、数値解析を行い、効率的に回路素子 L,C を構造中に実現する構造の開発を行う。ここでも、数値解析法は FDTD 法を用いる。ここでは、実際の構造を模擬するために、解析は大規模となると考えられる。このことから、東北大学シナジーセンター設置大型計算機(SX-ACE,課金制)を計算に用いる。研究代表者はこの大型計算機を自由に使える環境にある。ここまでの得られた成果を国内研究会および国際会議に投稿する。投稿先は国内研究会では電子情報通信学会、国際会議はこの分野で世界最大規模の IEEE である。また、国内および国際研究者と積極的に意見交換を行い、研究課題を遂行する。

### (3)実験的検討

実験は、マイクロ波領域で行う。実験に必要な機器(ネットワークアナライザ, ホーンアンテナ, 電波暗室, ターンテーブル, 基板作製機器)は研究代表者所属機関所有の機器を用いる予定である。実験装置は図 2 の装置を用いる。この構成では、2 ポートのベクトルネットワークアナライザを用いて一方よりホーンアンテナを用いて送信および反射波の測定および、もう一方のポートより透過波の測定を行う。これにより、構造の透過波と反射波を複素数で求めることが出来る。これらの値より、等価的な透磁率および誘電率を求めることが出来る事。構造の作製には両面銅箔基板・コネクタ・真鍮製ボール等を購入し製作する予定である。基板掘削機を用いて

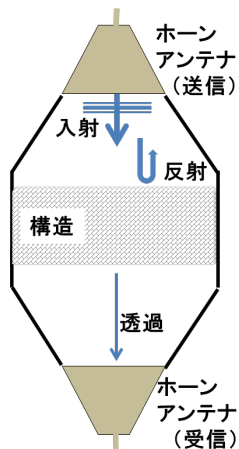


図 2 本研究で用いる実験装置の構成

構造にパターンを作成する予定である。ここまでで、得られた成果を国内論文誌に提出する。投稿雑誌はこの分野を広く網羅している電子情報通信学会である。

## 4. 研究成果

### (1)効率的な解析手法の開発

まず、理論的に構造の特性を明らかにする必要があり、その解析手法を開発した。まず、簡易な解析手法として回路モデルに注目した手法を検討した。回路モデルに注目した手法とは、実際の構造を図 3 に示すような等価回路で置き換える手法である。

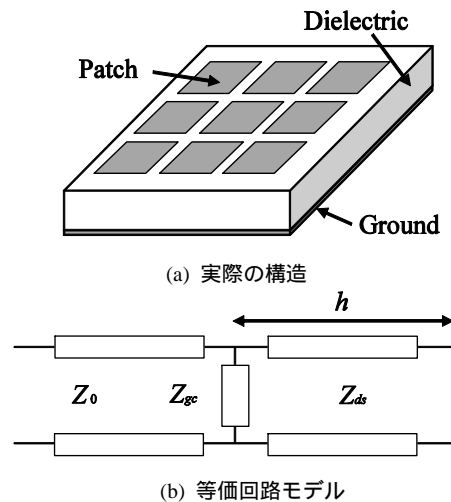


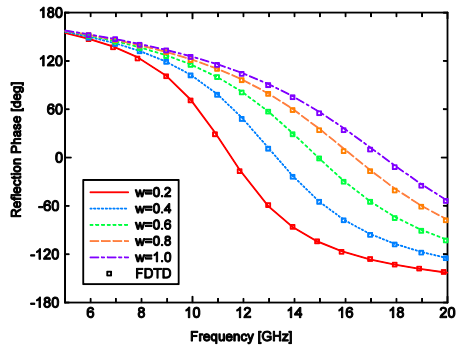
図 3 等価回路モデル

このように等価回路で解析できればその解析時間は極端に少なくなり効率的な解析ができる。従来より、この手法は提案されていたが、その精度が低いことが問題になっていた。そこで本研究では、高精度な等価回路モデルの開発を行った。この等価回路のインピーダンスは

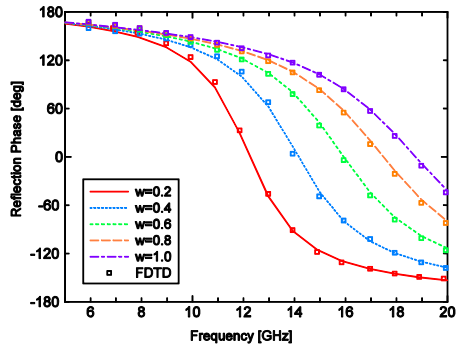
$$Z_{gc}^{TE} = -j \frac{\eta_{eff}}{2\alpha \left(1 - \frac{k_0^2 \sin^2 \theta}{k_{eff}^2}\right)}, \quad Z_{gc}^{TM} = -j \frac{\eta_{eff}}{2\alpha}$$

と表される。この式では、実験的な結果から求まる係数であり、これまでは、 $\alpha = 1.02(T - W)^3$  という値が用いられていた。

ここで、 $T$  は周期構造を構成する一つの周期長さ、 $W$  は金属パッチの幅である。詳細な検討の結果、この係数が計算精度低下の原因であることを突き止めた。そして我々はシミュレーションを駆使し最適な、 $\alpha = 1.15(T - W)^3$  と定めた。このように定めた係数を用いた解析結果を図 4 に示す。



(a) TE wave, angle of incidence : 30°



(b) TE wave, angle of incidence : 60°

図4 提案手法を用いた解析結果

この結果は図3 (a)のモデルに電波が入射した際の反射位相の様子を示している。図中の各線は提案手法で計算した結果であり、図中の各点は、電磁界を正確に解析する FDTD 法による結果である。図 4(a)は入射角度が 30 度、図 4(b)は入射角度が 60 度の際の結果である。また、図 3 (a)のパッチのサイズを変えシミュレーションを行っている。提案手法による計算結果は、どの入射角度および構造パラメータにおいても、電磁界解析の結果とよく一致している。これより提案手法は高精度であることが分かる。

### (2)広帯域な比透磁率 1 以下を示す構造の開発

上記の 4(1)で開発した手法及び FDTD 方を用いて広帯域に比透磁率が 1 以下になる構造の開発を行った。開発した構造を図 5 に示す。

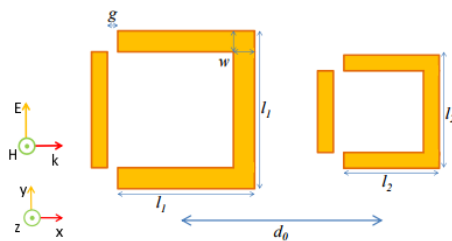


図5 開発した構造

本節ではシミュレーションによりその誘電率を評価した。シミュレーション中で構造の反射  $S_{11}$  および透過  $S_{21}$  は

$$S_{11} = \frac{R_{01}(1 - e^{i2nk_0d})}{1 - R_{01}^2 e^{i2nk_0d}}$$

$$S_{21} = \frac{(1 - R_{01}^2)e^{in k_0d}}{1 - R_{01}^2 e^{i2nk_0d}}$$

と表される。ここで、 $n$  は屈折率であり、シミュレーションにより求めた反射  $S_{11}$  および透過  $S_{21}$  より屈折率  $n$  を求める。また、誘電率と透磁率と屈折率は  $\epsilon = n/z$ 、 $\mu = nz$  の関係がある。ここで、

$$z = \pm \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11}) - S_{21}}}$$

である。

提案した構造の比透磁率を図 6 に示す。

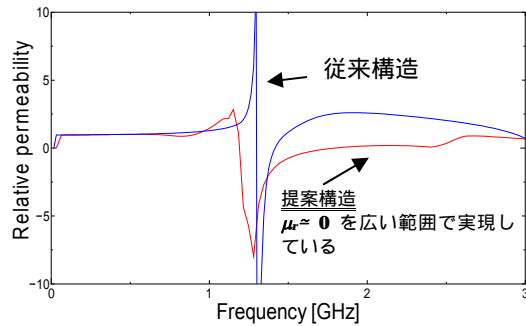


図6 比透磁率

このように、提案した構造は広い周波数範囲で比透磁率がゼロ付近になっていることが分かる。

### (3) 実験装置の開発

開発した実験装置の写真と寸法を図 7, 8 にそれぞれ示す。

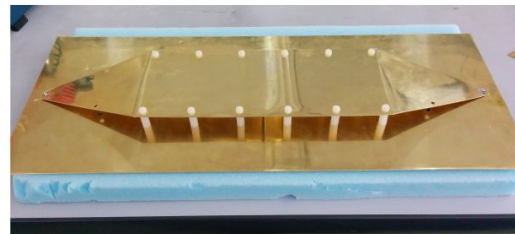


図7 開発した実験装置

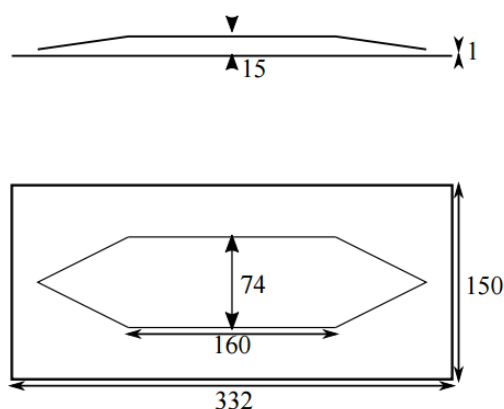


図8 開発した実験装置の寸法(mm)

本研究ではこの装置を用いていくつか実験を行なった．有効性については実験と比べることにおいて確かめている．

##### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計6件)

- [1] Akie Kuriyama, Toru Uno, and Takuji Arima, "Modification of Meta-film Surface Impedance Expression for Accurate Scattering Analysis of Meta-Surface Using Equivalent Transmission Line Model", IEICE Communications Express, Vol. 6 (2017) No. 6 pp. 331-335, 査読有, DOI:10.1587/comex.2016SPL0037
- [2] Keita Asano, Toru Uno, and Takuji Arima, "Acceleration of FDTD Calculation of EM Fields Due to Loop Antennas Used for MHz Band Wireless Transfer System Placed near Human Body", IEICE Communications Express, Vol. 6 (2017) No. 6 pp. 325-330, 査読有, DOI: 10.1587/comex.2016SPL0036
- [3] Shuntaro Omi, Toru Uno, Takuji Arima, Yujiro Kushiyama, and Takao Fujii, "Near-Field Far-Field Transformation Utilizing 2D Plane-Wave Expansion for Monostatic RCS Extrapolation", IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol.15, pp.741-, Dec. 2016, 査読有, DOI: 10.1109/LAWP.2016.2546342
- [4] 塩川 孝泰, 松坂 亮平, 櫛山 祐次郎, 有馬 卓司, 宇野 亨 "広帯域・単向性・薄型ダブルリングスロットアンテナ", 電子情報通信学会論文誌 B Vol.J99-B No.9 pp.782-785, 2016年9月, 査読有
- [5] Shuntaro Omi, Toru Uno, Takuji Arima, Yujiro Kushiyama, and Takao Fujii, "Planar scanning measurement of monostatic/bistatic RCS by near-feld far-field transformation based on fast multipole method" IEICE Communications Express, Vol. 4 (2015) No. 9 pp. 282-286, 査読有, DOI: 10.1587/comex.4.282
- [6] Yujiro Kushiyama, Takuji Arima, Toru Uno, " Differential-Type CRLH Leaky-Wave Antenna Using Stepped Impedance Resonators," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol.15, pp321-324, 2015.6, 査読有, DOI: 10.1109/LAWP.2015.2443130

〔学会発表〕(計10件)

- [1] Akie Kuriyama, Toru Uno, Takuji Arima, "Application of Meta-film Surface Impedance to Equivalent Transmission Line Model of Meta-Surface for Scattering Analysis", International Symposium on Antennas and Propagation 2016 (ISAP2016), Ginowan, Okinawa, Japan, 2016.10.24-10.28 [Best paper award finalist paper] [Student paper award finalist paper]
- [2] Keita Asano, Toru Uno, Takuji Arima, "ARMA/FDTD Analysis of Loop Antennas near Human Body for MHz Band Wireless Power Transfer System", 2016 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2016), Ginowan, Okinawa, Japan, 2016.10.24-28
- [3] Takuji Arima, Masahiro Gunji, Toru Uno, "Effective Modeling Method of Metamaterials in FDTD Method by Utilizing Surface Impedance Boundary Conditions," Proc. 2016 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC 2016), Seoul, Korea, 2016.8.21-25 [Invited]
- [4] Takuji Arima, Yuta Aoki and Toru Uno, "Wideband Negative Permeability Structures Based on Split Ring Resonators," Proc. 2015 IEEE AP-S International Symposium, 2015.7.21
- [5] Takuji Arima, Akie Kuriyama and Toru Uno, "ARMA/FDTD Technique for Reflection Properties of Periodic Structures at Oblique Incidence and Developing Wide Angle EBG Application," Proc. 2015 IEEE 4th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation, Bali Island, Indonesia, 2015.7.1 [Invited]
- [6] Takuji Arima, Kenta Kuwabara and Toru Uno, "Mhz Range Analysis by FDTD/autoregressive Moving Average Model Method," Proc. 2015 URSI Atlantic Radio Science Conference (AT-RASC), B31.4, Gran Canaria, Spain, 2015.5.22 [Invited]
- [7] Takuji Arima, and Toru Uno, "Development of Wide Frequency Band Negative Permeability Structures



Based on Split Ring Resonators”, Proc. 2015 International Workshop on Antenna Technology (IWAT 2015), WIS-31, Seoul, Korea, 2015.3.4

- [8] Takuji Arima, and Toru Uno, “ ARMA-FDTD Analysis of Reflection Characteristics of Periodic Structures with Oblique Incidence ” , Proc. 2015 Vietnam-Japan International Symposium on Antennas and Propagation, Ho Chi Minh Vietnam, 2015.1.8 [Invited]
- [9] Takuji Arima, Kazuki Ogawa, Toru Uno, “ Analysis of Reflection Characteristics of Periodic Structures with Oblique Incidence by using ARMA-FDTD Method ” , Proc. 2014 International Symposium on Antennas and Propagation, Kaohsiung Taiwan, 2014.12.2-5
- [10] Kuwabara Kenta ,Toru Uno, Takuji Arima, “ FDTD Analysis of MHz Band Using Autoregressive Moving Average Model ” , Proc. 2014 IEEE International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition (iWEM2014), Sapporo, Japan, 2014.8.4-6

なし

〔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

<http://web.tuat.ac.jp/~uno/>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

有馬 卓司 (ARIMA, Takuji)

東京農工大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：20361743

### (2)研究分担者

なし

### (3)連携研究者

宇野 亨 (UNO, Toru)

東京農工大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：80176718

### (4)研究協力者