

令和 2 年 6 月 11 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06416

研究課題名（和文）比透磁率が0付近を示す構造の応用に関する研究

研究課題名（英文）New Development of Application 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） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では下記を明らかにした。まず、広い周波数範囲で透磁率が0付近となる構造を開発した。さらに、この構造の応用についても明らかにした。さらに、広い周波数範囲で透磁率を測定できる装置を開発した。そして、その開発にはシミュレーションを多用し、シミュレーションで測定装置を開発できることを明らかにした。また、測定装置においては有効な校正方法を明らかにした。この校正方法は、TRL校正を基本とし、本研究に適用しその有効性を示している。以上より、磁性メタマテリアルの実用化に向け大きく前進したといえる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電波の中でもマイクロ波（通常は1GHz～30GHzの周波数の電磁波を指す）の電波は通信などで広く用いられている。今後、5G通信などで高周波数化が予測されるが、マイクロ波はその特性より今後も広く用いられると考えられる。本研究では、このマイクロ波を高度に制御する技術の開発を行った。技術としては透磁率に注目し、その透磁率を広い周波数にわたって、ごく低くすることのできる構造の開発を行った。その結果、電波を高度に制御できる構造を、実験的に確かめることができた。また、実験装置その物の開発にも成功した。この成果は今後、電波のさらなる応用につながるといえる。

研究成果の概要（英文）：In this research, we have clarified the following. First, we have developed a structure in which the magnetic permeability is close to 0 over a wide frequency range. Furthermore, the application of this structure was also clarified. Furthermore, we have developed a device that can measure magnetic permeability over a wide frequency range. Then, it was clarified that the simulation is heavily used for the development, and the measuring device can be developed by the simulation. We also clarified an effective calibration method for the measuring device. This calibration method is based on the TRL calibration method and is applied to this research and we have shown its effectiveness. From the above, it can be said that we have made great progress toward the practical application of magnetic metamaterials.

研究分野：電磁波工学

キーワード：メタマテリアル 磁性体 電波の制御

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

マイクロ波 (通常は 1GHz ~ 30GHz の周波数の電磁波を指す) の電磁波は通信などで広く用いられている。今後、5G 通信などで高周波数化が予測されるが、マイクロ波はその特性より今後も広く用いられると考える。一方、電磁波は物理法則により周波数によってその特性を大きく変える。電磁波を広く活用するには、高度な電磁波の制御技術を開発する必要がある。電磁波の制御には、レンズを用いる方法や誘電体および透磁率を用いるのが一般的であった。200 年代になり、メタマテリアルという概念が現れた。この概念は、これまで自然界には存在しない電気定数を、構造を工夫することにより実現するというものであった。その結果、負の誘電率・透磁率・負の屈折率を実現できるようになってきた。これらメタマテリアルのなかでもマイクロ波領域では自然界に存在しない 1 以下の誘電率や透磁率を示す構造が実現されてきた。これらは図 1 に示すように同じ構造を繰り返し配置する周期構造で実現されるのが特徴である。マイクロ波領域でのメタマテリアルの研究は、メタマテリアル構造の開発、アンテナへの応用、電磁波制御技術の開発に大別される。それぞれの現在の研究動向について本研究と対比させながら簡単に述べる。については構造を工夫し広角度な入射波に対して安定して動作する構造に関する検討が主であり、誘電率・透磁率の制御という観点での検討は広く行われていない。本研究の背景となる誘電率・透磁率の制御については応募者が検討している研究が広く引用されている現状である。これは、誘電率の周波数特性について Drude モデルで近似されることが有名でありこの概念に留まっているためと考える。については回路的に電磁波の位相を制御する CRLH と呼ばれる線路が広く応用されている。これは回路的に波長を制御しているとも考えられる。については、文献 (Anna Pastuszczak, Opt. Quant Elect. 2015) において $0 < \mu_r$ or $\epsilon_r < 1$ の範囲の媒質があればこれまでの概念と異なる新しい電波の吸収構造を実現できる可能性が示唆されているが、実用化に関する検討は全く行われていないのが現状である。以上より、比透磁率 μ_r が 0 付近の構造の応用に関する検討は基礎的検討もしくはその可能性が示唆されているだけで、応用に関する検討はまだ行われていない状況である。

一方、研究代表者応募者はこれまで科研費基盤 C の支援によって遂行された研究成果の一部として、ごく広い範囲で透磁率が 0 付近の値を示す構造の開発に成功した。この研究においては、負の透磁率を実現することが大きな目的であったためにこの現象は確認したが、この現象の応用に関する研究を発展させる事は出来なかった。しかし、この現象を用いることで構造中の電磁波は波長が極端に長くなり、結果的にどの場所でも同相になる。さらには、上述した文献では、全く新しい電波吸収構造の概念が提案されており、この実現には 0 付近 (文献中では 0.02 程度) の誘電率・透磁率が必要になっている。なお、この電波吸収構造は電磁波解析では良く用いられる仮想媒質 (PML: Perfect Matched Layer) を実現しうる物である。このように、0 付近の透磁率を示す構造の発展により様々な応用が可能になる。

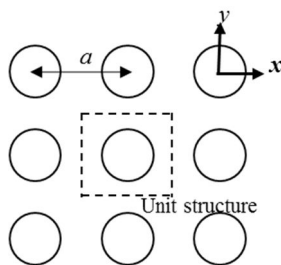


図 1 周期構造

2. 研究の目的

本研究では研究期間内に下記を明らかにすることを目的とする．特に実験的に示すことを目的とする．その為には装置の開発が必要であり．詳細は下記に示す．

まず本研究では，媒質中で波長が極端に長くなる現象に注目しその応用を図るものである．応用するためにはその現象の理解や効率的なモデル化技術の開発が必要不可欠である．本研究では研究代表者が所有するメタマテリアルのシミュレーション技術を駆使することにより波長が極端に長くなる現象を理解し，MNZ 構造をマイクロ波分野で応用するための原理を明らかにする．

3. 研究の方法

本研究では，シミュレーションおよび実験を用いて，目的を遂行する．シミュレーション手法は FDTD 法を用いた．

4. 研究成果

4. 1 提案構造

検討の結果，図 2 に示す 2 つの大きさが異なるリングを組み合わせた構造が提案された．この構造を図 3 のように周期的に並べて解析を行った．このときの S パラメータ，インピーダンス z ，比誘電率，比透磁率，分枝 m は図 4，のようになった．SRR より提案構造の方が広い周波数帯域で負の透磁率を示していることがわかる．

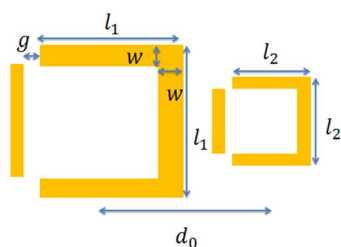


図 2 提案構造, $l_1 = 53\text{mm}$, $l_2 = 23\text{mm}$,
 $w = 3\text{mm}$, $g = 2\text{mm}$, $d_0 = 60\text{mm}$

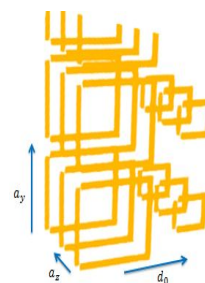


図 3 提案構造の周期配置

$a_y = 60\text{mm}$, $a_z = 4\text{mm}$, $d_0 = 60\text{mm}$

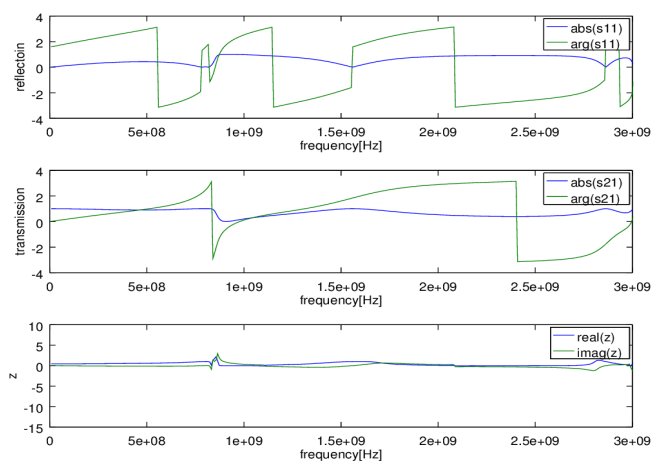


図 4 提案構造の電気特性

表 1 SRRs と提案構造の比較

構造	f_1 [GHz]	f_2 [GHz]	f_c [GHz]	FBW[%]
SRR	0.872	1.104	0.988	23.4
提案構造	0.784	1.937	1.361	84.7

特性を表 1 に示す．以上より本研究の目的の一つであった広帯域な MNZ 構造を実現することができた．

4.2 実験装置の開発

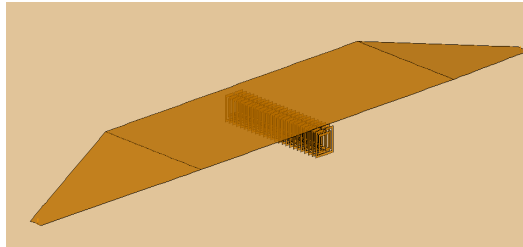


図 5 本研究で開発した MNZ 測定装置

本研究では，MNZ が実用に耐えうるために，実験的にその特性を明らかにする．測定にはネットワークアナライザを用いる．平行平板のポート部分から給電し，反射波と透過波の S パラメータをポート部分で測定する．平行平板のモデルは図 5 のようになる．まず本研究では測定に必要な校正技術を明らかにした．平行平板から S パラメータを測定するとき，図 6，7 に示す E_A, E_B の誤差回路の特性も入ってしまうため，誤差回路の特性を取り除く必要がある．誤差回路の特性は TRL 校正によって取り除く．

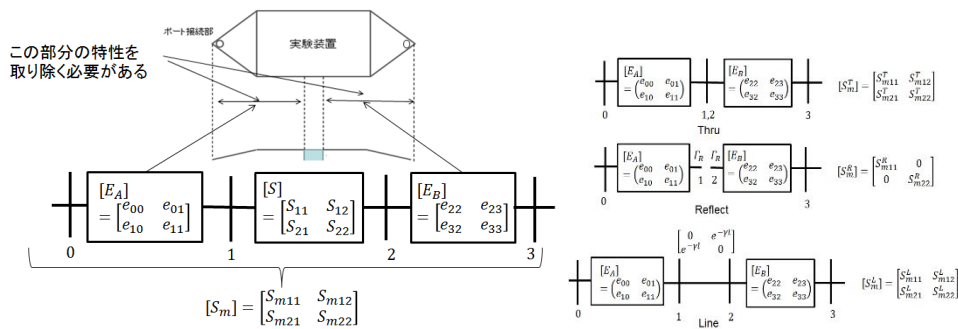


図 9 開発した測定器の等価回路モデル

この手法により MNZ の有効性を実験的に示すことができる．実際に開発した実験装置を示す．

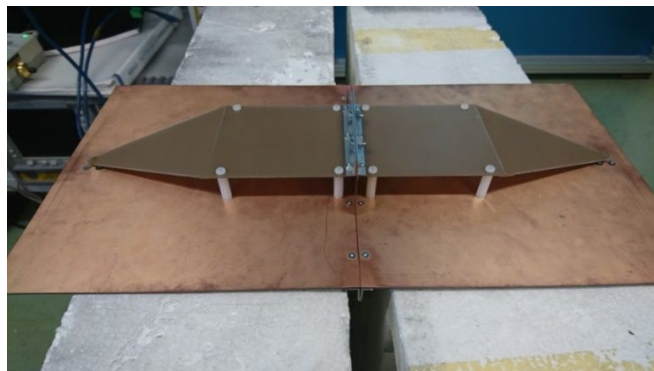


図 11 開発した測定装置

最後に、我々が開発した MNZ の測定を行った。作成した SRR を図 12 に示す。厚さ 3mm に切ったスタイロフォーム上に銅テープで SRR を作成した。SRR の測定結果とシミュレーションの結果を図 12 示す。共振によって負の透磁率を示す特性は得られたが共振周波数は 0.06GHz ほどずれた。この結果は図 12 に示す SRR の制作の精度が低いため起こったことだと考えられる。

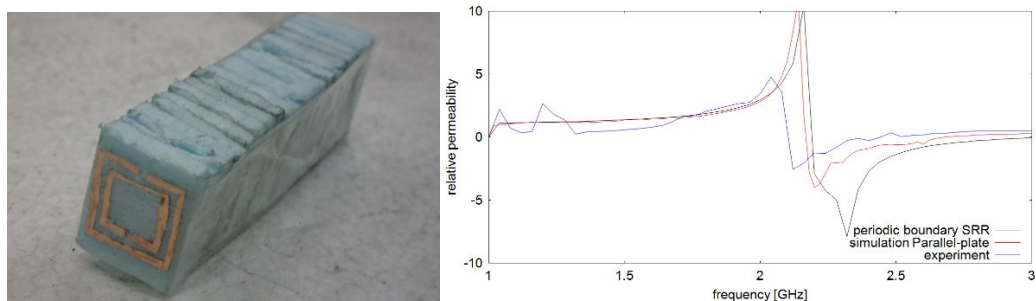


図 12 作製した SRR と測定結果

4.3 提案構造の応用技術の開発

本研究のもう一つの目的であり MNZ の応用に関する成果を報告する。図 13 のように比透磁率 $\mu_r = 10$ の厚さ 111mm の媒質に提案構造を組み込んで解析を行った。従来研究では透磁率を上げることはできても、下げる研究は行われていないと考える。本研究での解析の結果を図 13 に示す。広帯域の周波数帯域において透磁率が $\mu_r = 10$ より大幅に小さくなっていることが確認できた。

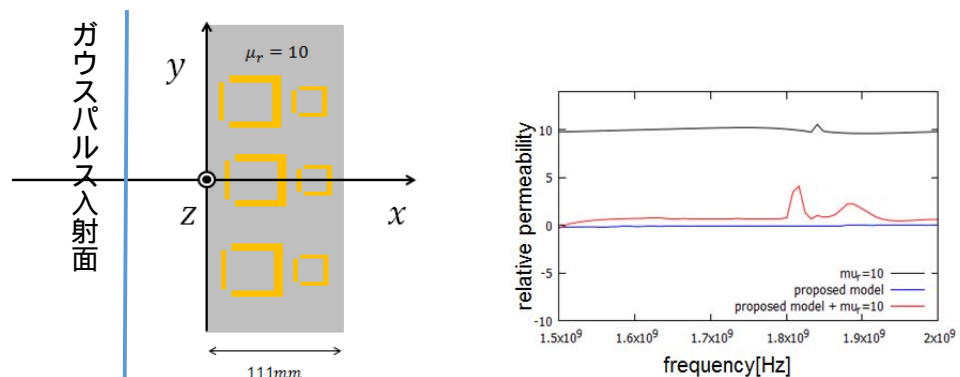


図 13 高透磁率 $\mu_r = 10$ 媒質中に組み込んだ提案構造のモデルと結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yujiro Kushiyama, Takuji Arima, and Toru Uno	4. 巻 -
2. 論文標題 Planar CRLH Leaky-Wave Antenna with Asymmetric Unit Cells	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proc. Progress In Electromagnetics Research Symposium 2018	6. 最初と最後の頁 1552
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shuntaro Omi, Toru Uno, Takuji Arima, Joe Wiart	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Reconstruction of Internal Field of Dielectric Objects for Noninvasive SAR Measurement Using Boundary Integral Equation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Uno Toru, Arima Takuji, Kurahara Akihide	4. 巻 6
2. 論文標題 FDTD modeling of nonperiodic antenna located above metasurface using surface impedance boundary condition	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 EPJ Applied Metamaterials	6. 最初と最後の頁 17 ~ 17
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1051/epjam/2019014	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Takuji Arima, Toru Uno
2. 発表標題 Wide Band Permeability Nearly Zero Structure
3. 学会等名 The 2018 Asian Workshop on Antennas and Propagation (AWAP2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 倉原彰秀、宇野 亨、有馬卓司
2. 発表標題 表面インピーダンス法を組み込んだFDTD法による周期構造上の水平ダイポールアンテナの解析
3. 学会等名 電子情報通信学会 アンテナ伝播研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takuji Arima, Keita Asano, Toru Uno
2. 発表標題 Low frequency Antenna Analysis by FDTD Method Utilizing Signal Processing Techniques
3. 学会等名 The 2017 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium in China (ACES-China 2017) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masakazu Yamaji, Toru Uno, Takuji Arima
2. 発表標題 Not Aligned Multiple-Region/Dual-Grid Finite-Difference Time-Domain Method
3. 学会等名 2017 Asian Workshop on Antennas and Propagation (AWAP) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yujiro Kushiyama, Takuji Arima, Toru Uno
2. 発表標題 Enhancement of Bandwidth for a TL Resonator Based CRLH Leaky Wave Antenn
3. 学会等名 2017 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Shuntaro Omi, Toru Uno, Takuji Arima, Joe Wiar
2. 発表標題 An Improved Current Reconstruction Technique for Internal Field Assessment of Dielectric Phantom
3. 学会等名 2017International Symposium on Antennas and Propagation(ISAP2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Shotaro Oka, Toru Uno, Takuji Arima
2. 発表標題 Development of Permittivity and Permeability Measurement System for Periodic Metamaterial
3. 学会等名 The URSI-Japan Radio Science Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡 祥太郎, 宇野 亨, 有馬卓司
2. 発表標題 平行平板を用いた周期構造メタマテリアルの誘電率および透磁率の広域測定
3. 学会等名 2020年 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	宇野 亨 (Uno Toru) (80176718)	東京農工大学・大学院工学研究院・教授 (12605)	