

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：84431

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04512

研究課題名（和文）メタマテリアル測定空間からなる高周波電磁気特性測定系の実現

研究課題名（英文）Realization of a RF electromagnetic property measurement system using metamaterial measurement system

研究代表者

伊藤 盛通 (Itoh, Morimichi)

地方独立行政法人大阪産業技術研究所・和泉センター・主任研究員

研究者番号：50712931

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,500,000円

研究成果の概要（和文）：誘電体共振器と導波管を組み合わせたメタマテリアルの電磁界シミュレーションモデルを構築し、単位セルモデルにおけるゼロ次共振が生じる条件と、誘電体共振器を一次元配列にしたシステムにおける伝搬モードを明らかにした。並行して試作検証を実施し、電磁界シミュレーションの妥当性が確認できた。

また、一次元配列にしたシステムにおける電磁界分布について、そのセル数の依存性と、強度が高い部分への試料の挿入時の変化に関する計算を実施した。その結果、電磁界が強い部分やセル数による分散曲線への影響について評価できたので、本システムを電磁気特性パラメータを測定するための基礎的な知見を得ることができたものと言える。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって、これまで電磁波を制御する手段、あるいは特異な電磁気特性を示す材料として研究されてきたメタマテリアルに対して、材料の電磁気特性の測定という新たな応用展開に向けたための基礎的な知見が得られた。比較的低いマイクロ波の領域でも、メタマテリアルにより制御した電磁界分布を用いることで、従来より微小な大きさや液体などの材料を感度高く測定することができれば、測定周波数帯域ごとに異なるシステムを用いずとも測定できる、広帯域での電磁気特性測定システムの構築が期待できる。

研究成果の概要（英文）：An electromagnetic field simulation model of a metamaterial consists of a dielectric resonator and a waveguide was constructed, and the conditions for zeroth-order resonance in the unit cell model and the propagation mode in a system with a one-dimensional array of dielectric resonators were clarified. In parallel, a prototype was fabricated and verified, and the validity of the electromagnetic field simulation was confirmed.

In addition, calculations were performed regarding the dependence of the number of cells on the electromagnetic field distribution in the one-dimensional array system, and the changes that occur when a sample is inserted into a part with high strength fields. As a result, the effects on the dispersion curve due to the parts with strong electromagnetic fields and the number of cells could be evaluated, and it can be said that basic knowledge for measuring electromagnetic characteristic parameters of this system has been obtained.

研究分野：電磁両立性

キーワード：メタマテリアル 誘電体共振器 ゼロ次共振

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

5G や IoT 社会の発展には高周波電子機器が必要不可欠であるが、その内部や周辺における広帯域の電磁ノイズが問題となる。しかし、先端材料を用いた電磁ノイズ対策の検討を進めるために電磁気特性の測定を行おうとしても、図1に示すように周波数帯域に対応して適用される手法が異なる。すなわち、試料の大きさや加工形状を変える必要があり、広い帯域における測定を行いたいニーズに応えられないという課題がある。

こうした機器・試料の寸法と周波数の関係を解決するアプローチの一つとしてメタマテリアルがある。メタマテリアルが示す特異な電磁気応答を測定系に適用することで、機器・試料の寸法と周波数の関係性という課題を解決できると考えた。

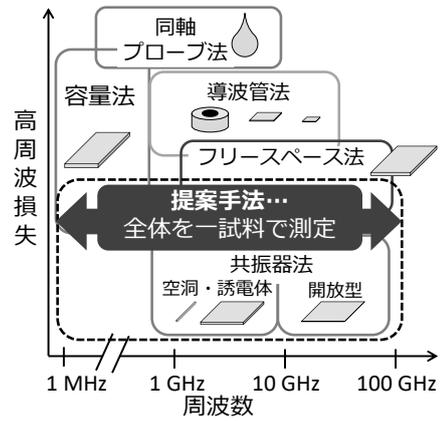


図1 測定手法と試料形状

2. 研究の目的

本研究では、これまで電磁波を制御する素子として研究されていたメタマテリアルについて、その概念を「測定空間」に拡張した新規の高周波電磁気特性測定系を構築する。これにより、測定帯域や試料加工の課題の原因である機器・試料の寸法と周波数の関係性を解決する。そうすることで、高周波損失の大小に依存せず、広帯域の電磁気特性を、任意形態の試料一つだけで測定できるシステムを実現し、センシング、エネルギーなど多様な分野で発展する高周波電子機器に向けた材料開発の迅速化と、電磁ノイズ対策へ貢献できる。

3. 研究の方法

本研究では、測定系を大きく以下の3つの領域に分けて検討した。[I] CRLHメタマテリアルからなる0次共振器で構成された送受信アンテナ、[II] 電界か磁界が強度最大の領域を形成する電磁界分布の整形領域、[III] 電界か磁界が最大で、試料を挿入することで信号の変化を見る測定領域。図2に概要図を示す。[III]の領域中で試料挿抜による信号変化は、ネットワークアナライザを用いて測定され、電磁気特性が導出される。また、電界と磁界はそれぞれ誘電率と透磁率の測定に対応し、個別に振幅最大の領域を用いることで低損失材料でも高精度に測定が可能となる。

研究の進め方としては、まず[I]の送受信領域を形成するCRLHメタマテリアルについて検討し、0次共振（右手系の共振と左手系の共振とがバランスし、位相が変化せずに伝搬する共振状態）を生じる系の設計を行った。当初はプリント基板上の導電性パターンを想定していたが、導体の損失が問題になることなどから誘電体共振器と導波管を用いる系に変更した。これに付随した効果として、系が[I]のように信号を送受信するだけの領域から、内部に局所的に強度の高くなる電磁界分布を形成できる[II][III]を兼ねた領域へと変化し、コンパクトになるものと考えた。

誘電体共振器と導波管からなる系について、Sパラメータと分散曲線、およびブロッホインピーダンスを求めることで伝送特性を把握したうえで、電磁界分布と伝搬モードについて調べた。そして得られた電磁界分布を基に、試料挿入を模擬した、誘電率もしくは透磁率を変えた領域を設け、伝送特性への影響を明らかにした。並行して、誘電体共振器と導波管を用いた伝送系の試作と、電磁界分布を評価するためのスキャンステージの構築を行った。

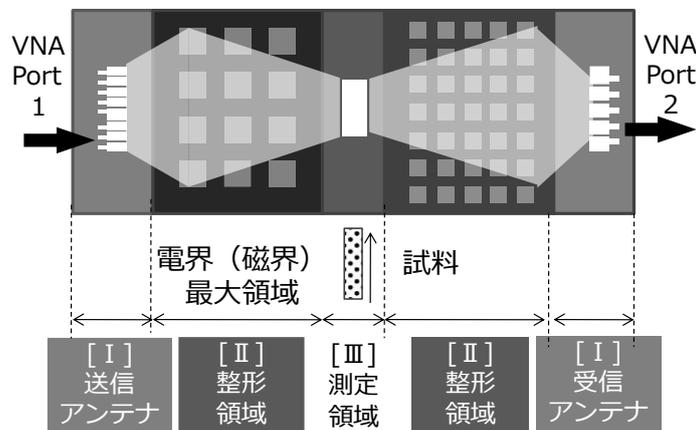


図2 メタマテリアル測定空間の概要図

4. 研究成果

4-1. CRLH メタマテリアルからなる送受信系の設計

【導電性パターンを用いるシステム】

プリント基板で作製することを想定して、インターディジタルキャパシタとスタブとを組み合わせた CRLH メタマテリアルを設計した。0 次共振が生じる寸法について求めたうえで、セル数を増やした場合も解析した。単位セルの様子を図 3 に、セル数を 3 に設定した場合の伝送特性の計算結果を図 4 に示す。セル数を増やした結果、0 次共振より低い周波数において -1 次、-2 次の共振が生じている。単位セル長 (24.8 mm) は、-2 次の共振周波数 (1.08 GHz) の自由空間波長 (278 mm) に対して十分小さい。この周波数を測定に用いることができれば周波数が低くてもコンパクトな測定系の構築が期待できる。

しかし、調査とディスカッションの結果、本システムでは導電部分の損失が問題となること、これを送受信アンテナとしたシステムにて電磁界分布を制御するのが難しいことが明らかになった。したがって、導電性パターンではなく誘電体共振器を用いるシステムを取り扱うことにした。

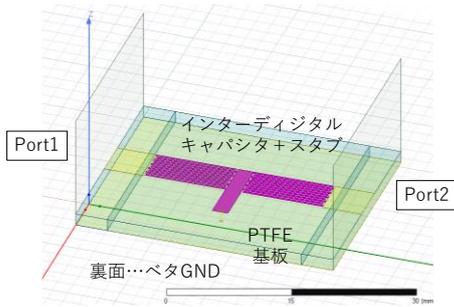


図 3 導電性パターンからなる系の様子

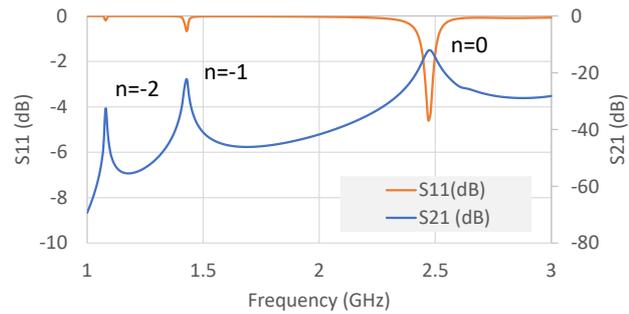
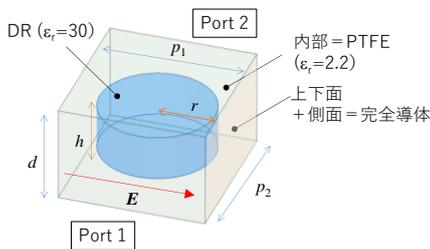


図 4 伝送特性計算結果 (セル数 3)

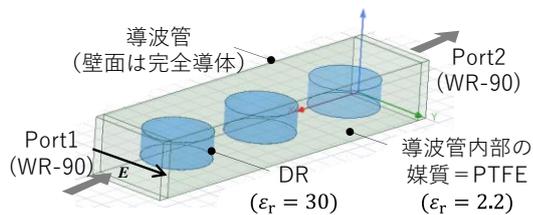
【誘電体共振器と導波管とを用いるシステム】

損失による影響が小さいと予想されること、および試料挿入の容易さの観点から、誘電体共振器の使用を検討した。PTFE で満たされた導波管中にディスク状の誘電体共振器を 1 次元に周期配列することでシステムを構築した。図 5 に、単位セルモデルおよび 1 次元配列 (セル数 3) の概要を示す。上下面および側面は導波管であり、電磁界シミュレーション上は完全導体とした。誘電体共振器の誘電率はジルコニアを想定して 38 と設定した。導波管開口部は WR-90 相当の寸法とすることで X 帯の電磁波を扱えるようにした。

まず、システムにおいて 0 次共振が生じる誘電体共振器の寸法を導出し、そのセル数依存性を確認した。0 次共振時の伝送特性と、分散曲線のセル数依存性を図 6 および図 7 に示す。 $\beta p = 0$ におけるバンドギャップが無く、かつ、伝送係数 (S_{21}) の位相が 0° 程度になっていることから、本システムの場合は 10.2 GHz で 0 次共振が生じていることがわかる。これらの結果から、誘電体共振器の 1 次元配列構造でも 0 次共振が生じること、および $n=3$ 以上であればセル数を増やしても 0 次共振の周波数は影響が受けにくいことが確認できた。



(単位セルモデル)



(多セルモデル)

図 5 誘電体共振器と導波管からなる系の様子

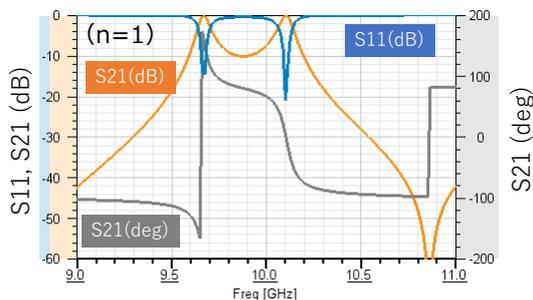


図 6 単位セルモデルにおける伝送特性

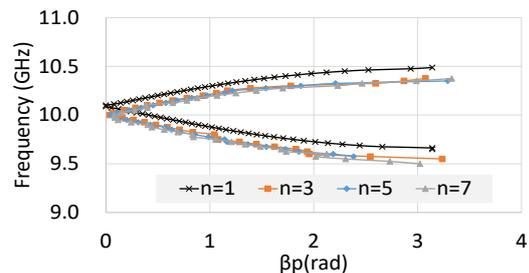


図 7 分散曲線のセル数依存性

4-2. 電磁界分布および伝搬モードの解明

多セルモデルにおける0次共振（周波数は10.1 GHz）が生じている際の電磁界分布について求めた。セル数を3としたときの分布を以下の図8に示す。電界は導波管側壁から誘電体共振器を貫通、磁界は誘電体共振器の内部を回転するような分布となっており、EH₁₀₁モードで伝搬していると考えられる。また、電磁気特性の計算結果からも磁界が共振している。このことから、磁界が共振している部分に透磁率の高い試料を配置した場合に伝送特性が影響を受けやすいものとする。なお、図8に示した伝送特性において $S_{21} = 0$ (dB)となった周波数のうち、0次共振はしていない9.6 GHzにおいてはTE_{01δ}モードで伝搬している。また、これらの電磁界分布はセル数を7まで増やしても変化しないことを確認した。

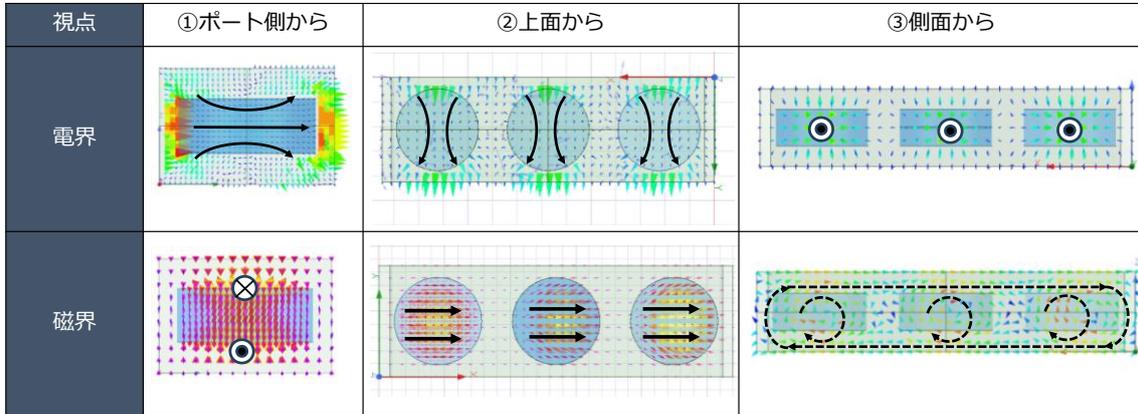


図8 0次共振時（10.1 GHz）の電磁界分布（セル数3）

4-3. 試料挿入時の影響評価

電磁界分布を求めたことで、誘電体共振器の上下面における磁界強度が高いことが明らかになった。そこで、磁界強度が高い位置に試料を配置した場合の伝送特性への影響を、バンドギャップの広がり方から評価した。一次元配列する誘電体共振器のセル数を1~7に設定し、共振器と同じ直径のディスク状の試料（厚さ0.1 mm）を全ての共振器の上部に配置した。試料の誘電率を固定（ $\epsilon_r = 1$ ）して透磁率を変化（ $\mu_r = 1, 2, 4, 6$ ）させた場合と、透磁率を固定（ $\mu_r = 1$ ）して透電率を変化（ $\epsilon_r = 1, 2, 4, 6$ ）させた場合とを比較した結果を図9に示す。実線はバンドギャップの高い方の周波数端（ f_{RH} ）、点線は低い方の周波数端（ f_{LH} ）を表している。

透磁率が大きくなるにしたがい、バンドギャップを表す f_{RH} と f_{LH} の間隔が大きくなった。それに対して誘電率を大きくしてもバンドギャップの変化は小さかった。つまり、磁界強度が高い部分に磁性体を配置することで、透磁率による影響を評価しやすくなっているものと考えられる。また、セル数を増やした場合には透磁率によるバンドギャップの変化量が小さく、単位セルにおける変化量が最も大きくなった。このことから、試料の配置による周期性への影響は小さく、試料の電磁気特性を測定する際にはセル数は少ない方が高感度になるものと考えられる。

同様な検討をセルの中に配置した場合や中央セルのみに配置した場合でも行った。その結果から、セル内部よりもセル上部に配置した場合に影響が大きくなった。これらの結果から、本システムが透磁率の測定に応用できる可能性がある。電界強度が強いモードになるよう制御できれば誘電率への展開も考えられる。

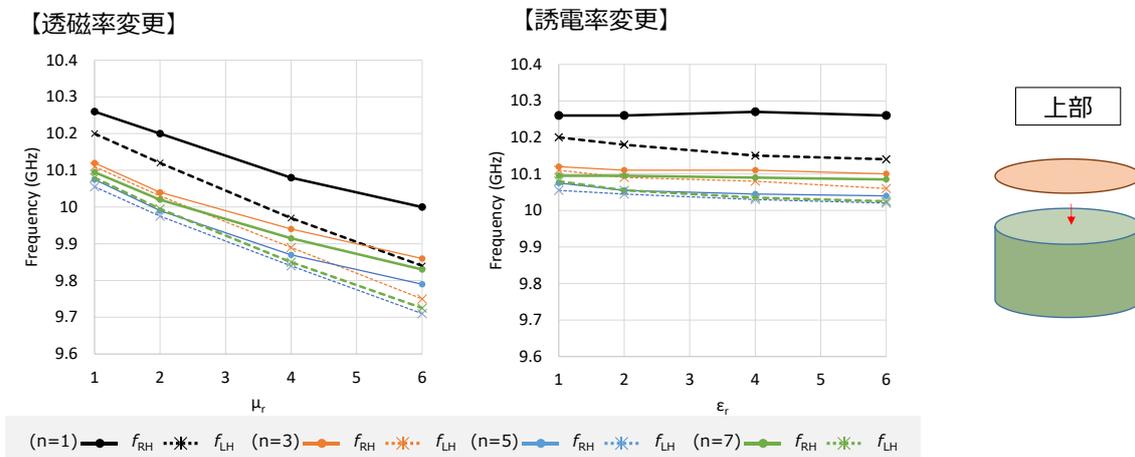
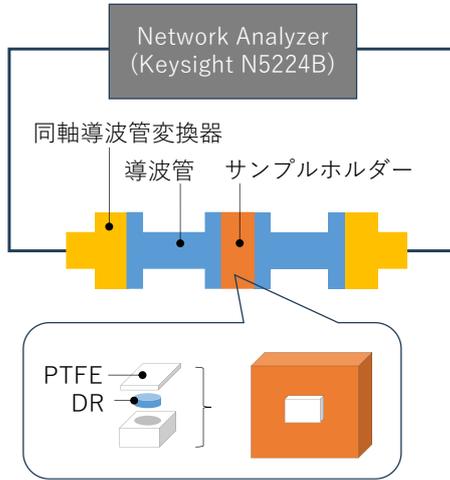


図9 誘電体共振器上に試料を配置した場合のバンドギャップ端周波数の変化

4-4. 試作検証

電磁界シミュレーションで設計したシステムについて、実際に試作を行った。誘電体共振器を含む PTFE からなるサンプルホルダーを、銅ブロックで作製した導波管内部に配置し、ネットワークアナライザで測定できるように導波管と同軸導波管変換器に接続した。図 10 に測定系の概要および実際の様子を示す。単位セル、およびセル数 3 の 1 次元配列構造について伝送特性を測定した結果、シミュレーションと概ね同様な結果を得られた。

【測定系】



【実際の様子】



図 10 測定系の概要

また、導波管内部の電磁界分布を求めるため、XY スキャンステージからなる測定系の構築を完了した。今後の展開としては、上記サンプルホルダーの壁面を改造して漏れ電界を測定できるようにしたうえで、電磁界分布および伝搬モードを調べ、実際に磁界強度が強い部分があるかを検証したうえで試料の配置と伝送特性への影響を評価することが考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 伊藤盛通
2. 発表標題 右手・左手系混在型メタマテリアルの応用展開
3. 学会等名 産業技術連携会議 近畿地域部会 情報電子分科会 研究交流会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊藤盛通、上田哲也
2. 発表標題 一次元CRLHメタマテリアルにおける材料パラメータと分散特性との相関に関する一検討
3. 学会等名 2024年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2024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
研究分担者	上田 哲也 (Tetsuya Ueda) (90293985)	京都工芸繊維大学・電気電子工学系・教授 (14303)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------