

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 5 月 29 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2022～2023

課題番号：22K18810

研究課題名（和文）非相反座標変換媒質の創成

研究課題名（英文）Establishment of nonreciprocal coordinate transformation medium

研究代表者

真田 篤志（Sanada, Atsushi）

大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授

研究者番号：20264905

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、伝搬方向によって異なる独立した座標系を与える非相反座標変換媒質の構成理論を構築した。その媒質で構成する非相反透明マントを設計し、その動作を数値的に検証した。まず、複数のジャイレータで構成される非相反集中定数素子を考案し、それを用いて非相反性2次元異方性媒質モデルの回路トポロジーを提案した。更に、提案する2次元非相反異方性媒質を用いてカーペットクロークを設計し、数値散乱シミュレーションにより、入射角度45度の入射ビームに対してはあたかもこぶがない鏡面反射をするが、入射角度が-45度の入射ビームに対してはこぶによる散乱が見られるという、非相反透明マント媒質の動作を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、これまで手法が確立されていない2次元非相反座標変換媒質の実現可能性を探るという点で挑戦的であり、変換電磁気学の新たな分野を開拓するものである。さらに本研究は、理論的・学術的な貢献のみならず、光学領域や電波領域において、相手から探知されないがこちらから探知できるような画期的な非相反性レーダ技術や、新たな無線通信技術等への応用可能性があり、工学応用的にも重要性は高く、社会変革をもたらす可能性がある。

研究成果の概要（英文）：In this study, a nonreciprocal coordinate transformation medium which gives different independent coordinate systems depending on the propagation direction is proposed and a nonreciprocal cloak operation based on the proposed medium are numerically confirmed. First, a nonreciprocal lumped element model composed of multiple gyrators is proposed, and a circuit topology of a nonreciprocal two-dimensional anisotropic medium based on the proposed nonreciprocal lumped elements is devised. Then, a carpet cloak with the proposed two-dimensional nonrelativistic anisotropic medium is designed, and it is numerically confirmed that the nonreciprocal cloak has nonreciprocal behavior in which the incident beam with the incident angle of 45 deg has a specular reflection without bump, whereas an incident beam with the incident angle of -45 deg has scattering due to a bump.

研究分野：メタマテリアル

キーワード：メタマテリアル 変換電磁気学 透明マント 非相反

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 透明マンツのジレンマ

相手から見えなくなる透明マンツを被ると、実は原理的には自分からも相手を見ることができなくなる。では、相手からは見えないが自分からは相手が見える、図 1 のような非相反の透明マンツはどうすれば実現できるであろうか? 本課題はこのジレンマの解消に答えるものである。



図 1 非相反透明マンツ

(2) クローキングとメタマテリアル

覆うと物体が見えなくなる「透明マンツ」や、存在しないものをあたかもあるように見せかける「イリュージョン」、背景をカモフラージュする「光学迷彩」など、従来技術では不可能であった光制御が材料レベルで実現可能であることが理論的に示されている (Pendry et al., *Science* **312**, 1780, 2006)。これらの技術はクローキングと呼ばれている。物体を不可視化する透明マンツは、光源と観測者の間にある遮蔽物 (散乱体) を、波長に比べて小さい材料片で構成された人工材料メタマテリアルで囲み、光源からの入射光を反射や散乱させることなくメタマテリアル内で迂回させて散乱体の前方へ届けるという仕組みで動作する。

(3) 座標変換媒質

このメタマテリアルの設計には座標変換が用いられる。図 2 は円筒状の領域に物体を隠す透明マンツの座標変換の例である。ここでは、左図の半径 b の領域 ($0 \leq r \leq b$) が、右図の内径 $2a$ の外径 $2b$ の円環領域に、元の空間中の点 X とメタマテリアル内の点 Y が原点 O を除いて全単射 $f: X \rightarrow Y$ となるように座標変換される。メタマテリアル設計では、この座標変換の前後でマクスウェル方程式が保存されるように空間中の誘電率テンソルと透磁率テンソルが選ばれる。この材料は座標変換媒質と呼ばれている。この操作により、元の空間とメタマテリアル中の空間は等価な空間となり、光はメタマテリアルにどの角度から入射しても、あたかも座標変換前の元の領域を通過しているかの如く伝搬し、半径 a の領域内にある物体によって反射や散乱を受けることはない。よって、この物体は外部の空間から見えなくなる。既にこの媒質設計のための媒質モデルが提案され、動作が実証されている (Sanada, *IEEE TMTT*, **63**, 12, 2015)。

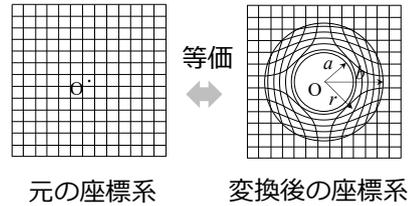


図 2 透明マンツの動作

(4) 非相反座標変換

透明マンツのジレンマの原因は系の相反性から来るものである。そこで、座標変換媒質に時間反転に対して対称性を持たない非相反素子を導入する。これにより、例えば図 3 のように、 $x > 0$ の半空間から入射した順方向の光に対しては座標変換が施されるが、 $x < 0$ の半空間から入射した逆方向の光に対しては座標変換が施されない非相反の座標変換を考える。これまで、このような伝搬方向によって独立に実効媒質パラメータを与える 2 次元以上の非相反の座標変換媒質の実現例はなく、媒質設計の理論は未開拓である。

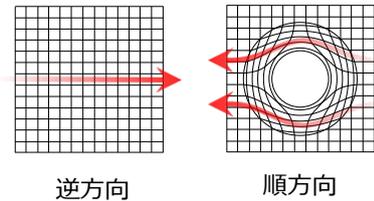


図 3 非相反座標変換

2. 研究の目的

本研究では、非相反透明マンツの実現のため、世界初となる非相反座標変換媒質を開発することを目的とする。非相反座標変換媒質のモデルを開発し、伝搬方向により異なる媒質パラメータを示す非相反座標変換媒質の設計理論を確立する。

3. 研究の方法

(1) 非相反座標変換媒質モデルの構築

非相反座標変換媒質を実現するため、媒質中に非相反素子であるフェライト素子を導入する。本研究では、図 4 に示す従来の相反性を示す 2 次元座標変換媒質等価回路モデル (Sanada, *IEEE TMTT*, **63**, 12, 2015) に対し、例えば図の各ブランチにフェライトアイソレータを挿入し、系の回路方程式とマクスウェル方程式との対応関係を調べ、波の伝搬方向に対

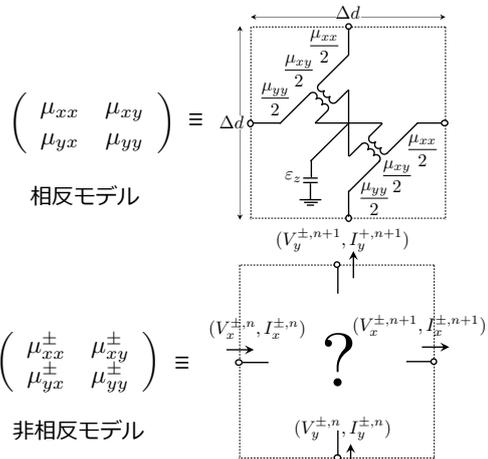


図 4 座標変換媒質モデル

して独立な実効媒質パラメータを与える回路トポロジーを探索する。挿入の組み合わせは膨大となるが、対称性と実装性を考慮しながら網羅的に調べる。得られた媒質モデルの回路素子と実効的媒質パラメータの関係を求め、媒質設計の理論を構築する。これが媒質実装の際の設計図となる。

(2) シミュレーションによる媒質動作検証

次に、この媒質の振る舞いを数値シミュレーションにより確認する。非相反素子を導入した系に波を順方向と逆方向に入射させた場合の伝搬の様子を、SPICE 回路シミュレータを用いて調べることで 2 次元の非相反性を確認する。これをマクスウェル方程式に基づく異方性媒質の理論値と比較して設計理論の妥当性を確認する。

(3) 非相反透明マントの動作確認

非相反座標変換を用いて非相反透明マント媒質を設計し、その非相反動作を電磁界シミュレーションにより確認する。

4. 研究成果

(1) 非相反集中定数素子

波の入射方向によりインピーダンスが異なる図 5 の様な回路を提案した。本回路は 2 つのサーキュレータおよび 2 つのアイソレータ、そして 2 つの異なるインピーダンスをもつ集中定数素子で構成されている。これを非相反集中定数素子と呼ぶ。

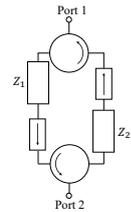


図 5 非相反集中定数素子

本素子に対する回路解析により、ポート 1 からポート 2 への波に対してはインピーダンス Z_1 の素子として見え、一方ポート 2 からポート 1 への波に対してはインピーダンス Z_2 の素子として見えることを示した。

図 6 に $Z_1 = j\omega L_1$ および $Z_2 = j\omega L_2$ ($L_1 = \pi$ nH, $L_2 = \pi/2$ nH) とした場合の系の

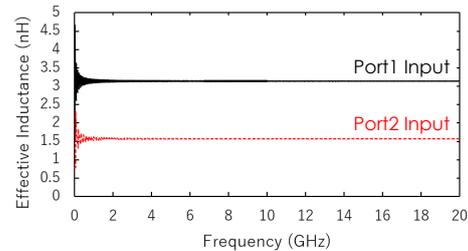


図 6 非相反集中定数素子の数値計算結果例

実効インダクタンスの回路シミュレーション結果を示す。ポート 1 および 2 から波を入力した場合の実効インダクタンスをそれぞれ黒線および赤線で示す。図の様に、ポート 1 および 2 の入力にしたがって実効インダクタンスがそれぞれほぼ L_1 および L_2 の異なる値に見える非相反な集中定数素子として動作することが数値的に示された。なお、周波数が低い場合にリップルが生じているが、これはアイソレータの導入により片側の素子の反射波が抑制されていることによるものである。

(2) 非相反集中定数素子を用いた非相反異方性媒質

提案する非相反集中定数素子を用いて実効透磁率と実効誘電率が同時に非相反な異方性媒質を提案した。図 7 にその回路トポロジーを示す。本回路は $x=y$ の対称面に対して順方向および逆方向

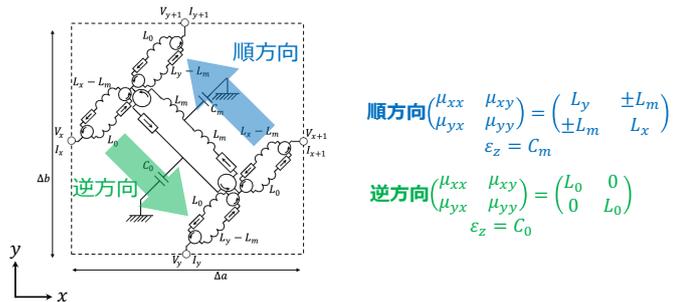


図 7 実効透磁率と実効誘電率が同時に非相反な異方性媒質

(3) 非相反異方性媒質を用いたカーペットクロック

前項で提案する非相反な異方性媒質を用いて、図 8 の様な非相反カーペットクロックを設計した。

このカーペットクロックは、こぶに対して斜め 45 度で入射する波に対してはこぶがなく鏡面反射するが、反対に -45 度で入射する波に対してはこぶによる散乱が発生するというものである。



図 8 非相反カーペットクロック

本非相反カーペットクロックの動作を回路シミュレーションにより確認した。但し、計算では回路解析の簡単化のため、対角項のみ非相反性を持たせた。

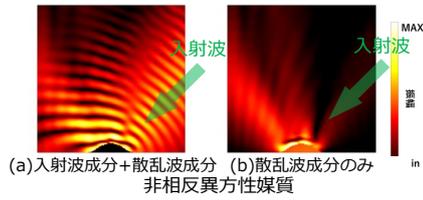


図9 順方向(45度)入射の場合の電場分布.(シミュレーション)

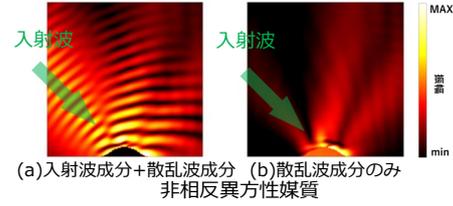


図10 逆方向(-45度)入射の場合の電場分布.(シミュレーション)

図9に順方向の45度で波が入射する場合の電場分布のシミュレーション結果を示す。図中の上図が非相反クロックの場合の計算結果であり、左図が入射波と散乱波のトータルの分布、右図が散乱波成分のみの分布ある。比較のため同図下に鏡面反射の場合の電場分布も示す。これらは良く一致しており、本非相反クロックが順方向の場合にはこぶを隠蔽するクロック動作を行っていることが確認できた。

一方、図10に逆方向の-45度で波が入射する場合の電場分布のシミュレーション結果を示す。図中の上図が非相反クロックの場合の計算結果であり、左図が入射波と散乱波のトータルの分布、右図が散乱波成分のみの分布ある。比較のため同図下に非対角項を無視した相反媒質に対する電場分布も示す。これらは良く一致しており、本非相反クロックが逆方向の散乱を模擬していることが確認できた。

これらの定量的な比較のため、バイスタティックレーダ断面積 (BRCS) を計算した。計算結果を図11に示す。図には順方向および逆方向の非相反異方性媒質のBRCS、および比較のために平らな鏡面および非対角項を無視した相反媒質に対するBRCSの計算結果も併せて示す。図の様に、順方向の非相反媒質のBRCSは、平らな鏡面のそれと比較して良く一致した。また、逆方向の非相反媒質のBRCSは、非対角項を無視した総販売室のそれと比較して定量的にも良く一致した。

以上により、提案する非相反クロックの動作を確認すると共に、本非相反媒質の構成理論の妥当性を示した。

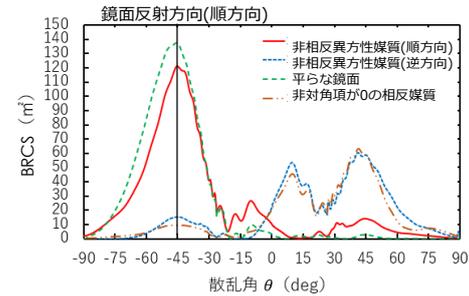


図11 バイスタティックレーダ断面積.(シミュレーション)

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 2件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 真田篤志
2. 発表標題 6Gに向けたメタサーフェス技術の最新動向
3. 学会等名 Microwave Workshops & Exhibition 2023（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 真田篤志
2. 発表標題 6G無線通信のためのメタサーフェス技術
3. 学会等名 2024年電子情報通信学会総合大会（招待講演）
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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------