

氏名	ながやま つとむ 永山 務
授与学位	博士(工学)
学位記番号	理工博甲第690号
学位授与年月日	平成28年3月17日
学位授与の要件	学位規則第4条1項
研究科, 専攻の名称	理工学研究科(博士後期課程) 物質工学系専攻
学位論文題目	Study on Distributed Anisotropic Metamaterials for Transformation Electromagnetics
論文審査委員	主査 山口大学 教授 真田 篤志 山口大学 教授 久保 洋 山口大学 教授 羽野 光夫 山口大学 教授 嶋村 修二 山口大学 准教授 堀田 昌志

## 【学位論文内容の要旨】

It has been shown in the theory of general relativity that Maxwell's equations are invariant with coordinate transformations and rays of electromagnetic waves or lights are bent by gravitational field. On the other hands, Maxwell's equations can be invariant for arbitrary coordinate transformations with appropriate tensor conversions for the constitutive relations, in other words, arbitrary coordinate transformations can be realized by special materials with highly controlled constitutive parameters. This concept is referred to as the material interpretation of coordinate transformations. Based on this concept, high controllability of electromagnetic waves with enormously larger degrees of freedom is expected compared with those of conventional methods using mirrors, lenses, and the like. This whole concept of controlling electromagnetic fields based on the material interpretation of coordinate transformations is referred to as the *transformation electromagnetics* or *transformation optics*. With the transformation electromagnetics, there are a myriad of novel electromagnetic and/or optical materials and devices such as cloaks of invisibility, illusion media mimicking scattered waves by arbitral objects, and the like. In order to realize these unusual materials based on the transformation electromagnetics, anisotropy and inhomogeneity of permeability and permittivity tensors have to be highly controlled. This is quite difficult with conventional natural materials, however, it has been shown recently that this can be realized by artificially constructed materials composed of sub-wavelength constituents, or so to called *metamaterials*.

Studies on realization of cloaks of invisibility based on transformation electromagnetics have been extensively carried out recently. A cylindrical cloak of invisibility has been first implemented with split-ring resonators (SRRs) and has been demonstrated experimentally at microwave frequencies. However, its operation bandwidth is intrinsically narrow and losses are very high due to resonance properties of the SRRs. On the other hand, a non-resonant carpet cloak of invisibility has also been proposed to overcome the disadvantage. The carpet cloak of invisibility is implemented on a silicon substrate with cylindrical holes controlling the effective refractive index and wideband and low loss

characteristics have been successfully demonstrated with the carpet cloak of invisibility. However, the implementation method is essentially limited to cloaks based on quasi-conformal coordinate transformations since off-diagonal components of the permittivity tensor cannot be controlled. Therefore, the carpet cloak can hide only small objects comparable with the wavelength. Wideband and low-loss properties as well as full controllability of anisotropy including the off-diagonal tensor components are required to realize cloaks of invisibility based on transformation electromagnetics.

In this thesis, novel distributed full-tensor anisotropic metamaterials for transformation electromagnetics are proposed to realize wideband and low-loss characteristics as well as independent controllability of anisotropy based on the transmission-line approach. Based on the non-resonant transmission-line approach, the proposed metamaterials possess intrinsic wideband and low-loss characteristics from DC to a certain frequency in which the lattice constant is comparable with the wavelength. In addition, the full-tensor anisotropic metamaterials can be rigorously designed based on an equivalent circuit model proposed in this thesis. The proposed design theory is epoch-making in a sense that the theory directly can give structural parameters of metamaterial constituents that have hardly been given by any conventional design method. First, equivalent circuit models to individually control full-tensor anisotropy are proposed based on the circuit theory. This model is an abstract model of anisotropic metamaterials and can be a basis of the theoretical design as well as physical insights. Then, distributed anisotropic metamaterials are proposed to implement the abstract model. Design formulas to uniquely determine structural parameters of metamaterial constituents from material parameters are derived, which can hardly be found in any design theories and contribute to realization of cloaks of invisibility. Furthermore, a carpet cloak of invisibility is implemented on a dielectric substrate using proposed distributed anisotropic metamaterials, and the validity of the theory is confirmed by demonstrating an operation of the carpet cloak of invisibility at microwave frequencies.

Chapter 1 is devoted to the concepts of metamaterials and transformation electromagnetics with their historical backgrounds as well as objectives and goals of this research. In chapter 2, mathematical treatment and potentials of transformation electromagnetics are shown. Then, design formulas for a cylindrical cloak of invisibility are shown as an example. In chapter 3, the concept of transmission-line approach, which is the basis of this research, is shown from the point of view of duality of Maxwell's equations and telegrapher's equations. Then, abstract equivalent circuit models for full-tensor anisotropic materials are presented with physical insights of their operation. In order to confirm the validity of the theory, a carpet cloak of invisibility is designed with the circuit model and its operation is confirmed by circuit simulations. In chapter 4, novel distributed anisotropic metamaterials are proposed for implementations of the circuit model. Equivalence of the distributed anisotropic metamaterials to the circuit model is confirmed by circuit analyses, and the design formulas for structural parameters of metamaterial constituents are derived. In order to confirm the validity of the theory, a carpet cloak of invisibility is designed with the proposed distributed anisotropic metamaterials, and circuit simulations are carried out. In chapter 5, the carpet cloak of invisibility designed in the previous chapter is implemented on a dielectric substrate with the proposed distributed anisotropic metamaterials, and its operations are demonstrated experimentally by near-field measurements at microwave frequencies. In chapter 6, in order to show further potentials of the proposed distributed anisotropic metamaterials, an illusion medium mimicking scattered waves of an arbitrary object is demonstrated. The concept of the illusion media is shown and an illusion medium mimicking a groove is designed with the proposed

distributed anisotropic metamaterials, and its operations are demonstrated by circuit simulations. Finally, the results and outcomes as well as future prospects of this research are summarized in chapter 7.

## 【論文審査結果の要旨】

本論文では、座標変換に対してマクスウェル方程式が受けるテンソル変換と等価な構成関係式を持つ媒質により、マクスウェル方程式を保存する任意の座標変換を実現するという変換電磁気学の概念に基づき、電磁波や光を高度に制御するための人工媒質メタマテリアルの実現を目的としている。強く結合した単位素子からなる系に対して、回路論に基づく異方性媒質モデルを提案し、従来が困難であった透磁率テンソルの非対角項の完全な制御と広帯域特性・低損失性の両立を実現している。また実装のための分布定数異方性メタマテリアルを提案し、その構造を決定する媒質設計式を理論的に求めている。さらに、提案する分布定数異方性メタマテリアルを用いて、非直交座標変換に基づき透明マントの一種であるカーペットクロックを設計し、鏡面上にあるこぶの不可視化動作をマイクロ波帯において実験的に確認している。また、提案する分布定数異方性メタマテリアルを用いて鏡面上にあたかも窪みがあるかのように見せかけるイリュージョンクロックも設計し、その動作を回路シミュレーションにより示している。以上のことから提案するモデルと実装のための設計理論の妥当性・有用性を示している。

本論文の概要は以下の通りである。

まず、第1章は序論であり、メタマテリアルおよび変換電磁気学の概念と歴史を示した後、本論文の目的、目標、学術的意義を示した後、本論文の構成を示している。

第2章では変換電磁気学の数学的背景を概説し、Smithらにより最初に透明マントの実証実験が行われた円筒クロックの媒質設計例を示している。

第3章では伝送線路アプローチに基づく変換電磁気学のための異方性媒質モデルを提案している。まず、マクスウェル方程式と電信方程式の双対性による伝送線路アプローチの概念を示し、回路論に基づき、非対角項が非零のテンソルパラメータを持つ異方性媒質の媒質モデルを示している。さらに、提案する媒質モデルの妥当性を示すために、非直交変換に基づくカーペットクロックを設計し、その動作を回路シミュレーションにより確認している。

第4章では、前章で提案された媒質モデルを実装する分布定数異方性メタマテリアルを提案している。まず、提案する分布定数異方性メタマテリアルと媒質モデルとの等価性を示した後、媒質設計式を理論的に導出している。また本媒質が長波長近似下で周波数分散を持たず、本質的に直流から波長が単位素子と同程度になる高周波まで超広帯域に動作することを理論的に示している。さらに媒質設計理論の妥当性を示すためにカーペットクロックを設計し、その動作を回路シミュレーションにより確認している。

第5章では、前章のカーペットクロックを誘電体基板上に試作し、マイクロ波帯においてその動作を実験的に確認している。近傍界測定による散乱波の観測により、試作したカーペットクロックが正面方向からの入射波に対しても、斜め方向からの入射波に対しても、いずれも鏡面上に置かれたこぶを不可視とすることが確認されている。

第6章では、提案する分布定数異方性メタマテリアルの更なる応用として、鏡面上にあたかも窪みがあるかのように見せかけるイリュージョンクロックを設計している。イリュージョンクロックの概念を示した後、分布定数異方性メタマテリアルを用いて、入射角度によらず鏡面上の窪みと同じ散乱特性を示すイリュージョンクロックを設計し、その動作を回路シミュレーションにより確認している。

最後に第7章では、本論文で得られた結論を示し、本研究の今後の展望を述べている。

以上の様に、本論文で示された分布定数異方性メタマテリアルと変換電磁気学に基づく媒質設計の概念は学術的にも独創的で、かつ電磁波および光波領域において新たな材料・デバイス応用への展開が期待できる。

公聴会における主な質問内容は、クロックで隠す物体の大きさや形状と座標変換で得られるテンソルパラメータの非対角項との関係、透明マントの定量的評価法に関するもの、低損失性の理論的根拠に関するもの、本手法の理論的限界に関するものなどについてであった。いずれの質問に対しても発表者からの確かな回答がなされた。

以上より本研究は独創性、信頼性、有効性、実用性ともに優れ、博士(工学)の論文に十分値するものと判断した。

論文内容及び審査会、公聴会での質問に対する応答などから、最終試験は合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は下記のとおりである。(関連論文 計6編、参考論文 計0編)

- 1) T. Nagayama and A. Sanada, "Planar distributed full-tensor anisotropic metamaterials for transformation electromagnetics," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, Vol. 63, No. 12, pp. 3851-3861, Dec. 2015.
- 2) A. Sanada and T. Nagayama, "Transmission line approach for transformation electromagnetics," *Proc. URSI Int. Symp. Electromagnetic Theory*, May 2013, pp. 336-337.
- 3) T. Nagayama and A. Sanada, "Physical equivalent circuit model for 2D full-tensor anisotropic metamaterials," *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, June 2013, pp. 1-3.
- 4) T. Nagayama and A. Sanada, "Specular reflection from a sinusoidal periodic boundary by a carpet cloak of invisibility," *Asia-Pacific Microwave Conf. Proc.*, Nov. 2013, pp. 1209-1211.
- 5) A. Sanada and T. Nagayama, "Transmission line approach to 2D full-tensor anisotropic metamaterials for transformation electromagnetics," *Int. Conf. Electromagnetics Advanced Appl.*, Aug. 2014, pp. 804-805.
- 6) A. Sanada and T. Nagayama, "Transmission line metamaterials for transformation electromagnetics," *Eur. Microwave Conf.*, Oct. 2014, pp. 965-967.