

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：32604

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2013

課題番号：21560043

研究課題名(和文) 完全な透明マントの理論と設計の研究

研究課題名(英文) Theory and design of perfect invisibility devices

研究代表者

落合 友四郎(OCHIAI, Tomoshiro)

大妻女子大学・社会情報学部・准教授

研究者番号：60423034

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：メタマテリアル科学の発展に伴い、いわゆる透明マントの実現可能性の探究がされるようになってきた。透明マントとは、光をうまく隠したい物の周りを迂回させて、あたかも直進してきたかのように光を誘導することのできる装置である。本研究では、3つの共形変換と正負の屈折率の組み合わせを用いることにより、2次元の等方性媒質による透明マントの設計図を完成させた。特に、位相遅れや反射による透明マントの不完全性の問題を乗り越えた新しい設計を導出できた。

研究成果の概要(英文)：Rapid progress in metamaterial sciences has made it possible to design cloaking devices that are able to guide electromagnetic fields around any object put inside has captured the attention of many researchers. In this research, we propose a novel method that uses three successive conformal maps and a combination of positive and negative refraction indices to enclose the trajectory of light rays. We show that our construction enables us not only to enclose the trajectory of light, but also to achieve perfect invisibility in isotropic media, without both phase delay and reflection.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理・工学基礎、応用工学・量子光工学

キーワード：透明マント 電磁気学 メタマテリアル

1. 研究開始当初の背景

ここ数年、メタマテリアル科学の発展に伴い、いわゆる透明マントの実現可能性の探究がされるようになってきた。透明マント(クロッキング)とは、宝物などを入れておく空洞があり、その周りを透明マントのデバイスで覆うことにより、デバイス自身を含めて宝物が外部の観測者から見えなくなる装置である。透明マントは、英語では「Cloaking」や「invisibility」などと呼ばれている。

透明マントの歴史はまだ浅く、2006年にPendry氏らによって、最初に透明マントの設計方法が理論的に提案された。彼らの研究では、異方性媒質の誘電率と透磁率を曲がった空間上の計量テンソルと同一視することによって透明マントを設計しており、装置のどこかの位置にどのような誘電率と透磁率を持つ物質を置けば透明マントとして機能するかということを示している。一方で、どのようにそのような誘電率と透磁率を持つ物質を具体的に作製するかは述べておらず、透明マントの実現可能性に言及した純粋に理論的な研究であった。

ところが、その同じ年すぐに同グループにより、マイクロ波領域において、その理論構成に従った透明マントの試作機が作製され、実験が行われた。この透明マントの試作機は、中空の円柱状であり、中心部分に物を隠すことのできる空洞がある。また、空洞の中心部分を覆うように円柱状にメタマテリアルが配置されている。彼らがマイクロ波領域に注目したのは、可視光に比べてマイクロ波の波長が十分長く、その波長以下に金属の微細構造を作るのが簡単であるという理由からと思われる。この試作機は可視光に対しては透明ではなく、特定のマイクロ波領域のみにおいて透明になっていた。また、この試作機は円柱状のために、円柱側面部分方向からのマイクロ波入射に対しては透明になっているが、上部や底面部からの入射に対しては透明にはなっていない。

また同じ頃、Pendry氏のグループとは全く異なる方式で、透明マントの設計方法がLeonhardt氏によって提案された。Pendry氏らは異方性媒質を用いる透明マント設計方法を提案しているが、Leonhardt氏は等方性媒質を用いた透明マントを提案している。

3次元構造まで考えると、Leonhardt氏の方式のような等方性媒質による設計は、異方性媒質よりも、透明マント製作が容易であると思われる。しかし、等方性媒質を用いた透明マントには、Nachmanの定理という数学の定理による本質的な困難が知られており、位相遅れや反射のない“完全”な透明マントは不可能であるということが示されていた。

(異方性媒質の透明マントにはそのような本質的な困難はないが、Pendry氏らの設計方法には、装置の境界付近でのパラメータの発散の問題がある。)

2. 研究の目的

これまで、いくつかの透明マントの設計方法が提案されてきたが、異方性媒質利用による製造の困難さ、境界付近での媒質のパラメータ(誘電率、透磁率など)の発散や、位相遅延、媒質境界における反射の問題など、製造可能な完全な透明マントの設計にはさまざまな問題があった。特に、実際の製造までを考慮すると等方性媒質による設計が望ましいが、数学の定理であるNachman's theoremにより、等方性媒質では位相遅延、媒質境界における反射の問題を完全になくすような“完全な”透明マント(perfect invisibility)は不可能であるなどの困難もある。

本研究では、これらの諸問題に対処し、これまでにない新しい透明マントの設計方法を考案することを目的とする。特に、3次元透明マント、等方性マテリアルと非等方性マテリアルを用いるときの違いや、時間遅れ、反射の問題、狭い波長領域の問題などにも取り組んだ。

3. 研究の方法

基本的に、透明マントの設計は、変換光学(Transformation optics)と呼ばれる手法を用いて行われる。変換光学では、我々の住む「物理空間」と仮想的な「数学空間」の2つの空間を用意する。「物理空間」は、フラットな空間であり、空間内に物質があり、光の軌道は物質の誘電率テンソル、透磁率テンソルによって曲がる。一方、「数学空間」は物質のない空っぽの空間であるが、非ユークリッド空間(曲がった空間)である。そして、空間の曲がり具合を表す値である計量テンソルによって光が曲がる。

マックスウェル方程式を座標変換に対して不変な形に書き直して、空間の歪みを表す計量テンソルと、誘電率テンソル、透磁率テンソルとの数学的な対応関係を求める。すると、透明マント設計のための基本公式を導くことができる。現在、知られている透明マントの設計図は、ほとんどの場合、この公式を用いて導出することができ、便利な公式である。

この公式において、用いる座標変換の種類によって、出来上がる透明マントの種類が決まる。一般座標変換を用いると、異方性媒質の透明マントになり、共形変換を用いると、等方性媒質の透明マントになることが証明できる。本研究では、この基本公式を基に透明マントの設計を行う。

4. 研究成果

これまで、いくつかの透明マントの設計方法が提案されてきたが、異方性媒質利用による製造の困難さ、境界付近での媒質のパラメータ（誘電率、透磁率など）の発散や、位相遅延、媒質境界における反射の問題など、製造可能な完全な透明マントの設計にはさまざまな問題があった。特に、実際の製造までを考慮すると等方性媒質による設計が望ましいが、数学の定理である Nachman 's theorem により、等方性媒質では位相遅延、媒質境界における反射の問題を完全になくすような "完全な" 透明マント(perfect invisibility) は不可能であると広く信じられていた。

等方性媒質を用いたクロージングデバイスを設計するためには共形変換を用いなければならない。ここで、空間次元を2次元に限定することによって、議論を簡単に行うことができる。2次元平面を複素平面と同一視すると、共形変換は正則複素関数となることを利用する。2次元空間において共形変換の変換則が与えられる。この変換則をみてもわかるが、座標変換が急激だと（座標変換の微分（傾き）が大きいと）、必要とされる屈折率分布範囲は広くなり、クロージングデバイスの作製が難しくなる。

我々は、屈折率分布の正負の組み合わせ、および3つの共形変換を用いて、等方性媒質による2次元のクロージングデバイスを設計した。まず、物理空間 z と3つの数学空間 w_1 、 w_2 、 w_3 を用意する。これら4つの空間はすべて2次元として複素平面と同一視する。そしてこれらの4つの空間の間に3つの共形変換を考える。

ここで、3つの共形変換に屈折率の変換則を適用することにより、物理空間 z 上の屈折率分布を求めることができ、等方性媒質をもちいたクロージングデバイス（透明マント）の設計図を得ることができた。

図1が、我々の住む物理空間におけるクロージングデバイスと光の経路の様子である。また、下図の原点付近にある点線に囲まれた部分が物を隠せる部分である。

以前は、Nachman の定理というものが知られており、等方性媒質では、完全な透明マント（位相遅れなし、反射なし）をつくることは不可能であると信じられていた。ところが、正負の屈折率を組み合わせるこの構成方法を用いると、Nachman の定理を回避して、完全な透明マントを設計できることは興味深い。また、正負の屈折率を組み合わせることは、空間の truncation の一つの構成方法になっており、透明マントの設計方法に応用で

きたことは興味深い。本研究の成果を踏まえて、さらに研究を進展させていきたい。

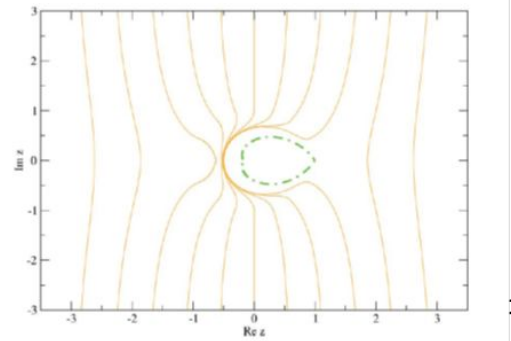


図1 2次元等方性媒質による透明マントを通るの光の経路

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計 7件)

T. Ochiai, “透明マントは実現するか？”、*応用物理*、査読有、第82巻 第1号 p.41 -45 (2013)

T. Ochiai, J.C. Nacher, “負の屈折率媒質と透明マントの物理学”, *マテリアル インテグレーション*、査読無、2011年9月号 (Vol.24 No.9), p.26 -34.

J.C. Nacher . T. Ochiai, “Plus-minus construction leads to perfect invisibility”, *Journal of Mathematical Physics*, 査読有, 52, 012903, 17pages (2011)

T. Ochiai, J.C. Nacher, “透明マントの設計方法”, *光アライアンス* 6月号, 査読無, Vol.20, No.6, (2009) p.12-16

〔学会発表〕(計 11件)

T. Ochiai , “ Perfect invisibility using negative refractive index metamaterials ” , *International Conference on Computational and Experimental Engineering and Sciences (ICCES 2013)*, Seattle, USA, May 24 - 28, 2013, Proceeding and oral presentation. (招待講演)

J. C. Nacher, T. Ochiai, “Perfect Invisibility Devices with Negative Refraction”, *Progress In Electromagnetics Research*

Symposium (PIERS 2012), Kuala Lumpur, Malaysia, 27-30 March, 2012, Proceeding and oral presentation.

T. Ochiai, J.C. Nacher, “Mathematical Modeling for Invisibility Devices”, 7th Vienna International Conference on Mathematical Modelling, (MATHMOD 2012), Vienna University of Technology, Vienna, Austria, February 15 - 17, 2012, Proceeding and poster presentation.

T. Ochiai, “透明マンツの物理学と COMSOL シミュレーション”, COMSOL カンファレンス 2011, 東京, 秋葉原 UDX (東京), 2011 年 12 月 2 日(招待講演)

T. Ochiai, J.C. Nacher, “Geometry and Cloaking Devices”, 9th International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics (ICNAAM 2011), G-Hotels, Halkidiki, Greece, 19-25 September 2011, Proceeding and oral presentation.

T. Ochiai, “Invisibility device with isotropic media using negative refractive index”, 1st Korea-Japan Metamaterials Forum 2011, Ewha Womans University, Seoul, Korea, July 7-9, 2011, Proceeding and oral presentation. (招待講演)

T. Ochiai, “メタマテリアルと透明マンツ(クローキング)の設計方法”, 「ナノ構造・物性」第 3 回研究会シンポジウム「プラズモニクス, メタマテリアルの最前線」, 神戸大学, 3 月 18 日 (2011)(招待講演)

T. Ochiai, J.C. Nacher, “Perfect invisibility in isotropic media based on plus-minus construction”, The 3rd International Topical Meeting on Nanophotonics and Metamaterials 3-6 January, 2011, Tirol, Austria, (NANOMETA 2011) Proceeding and poster presentation.

T. Ochiai, “透明マンツの設計方法とメタマテリアル”, 国際高等研究所研究プロジェクト「メタマテリアルの開発と応用」2009 年度第 4 回研究会, 国際高等研究所, 1 月 8, 9 日(2010)(招待講演)

T. Ochiai, “透明マンツの物理学”, 第

2 回 NAIST メタマテリアルセミナー, 奈良先端科学技術大学院大学, 11 月 17 日, (2009) (招待講演)

T. Ochiai, “負の屈折率を利用した透明マンツの新しいデザイン”, 日本物理学会 2009 年秋季大会 領域 5, 領域 1 合同シンポジウム(主題:メタマテリアル:サブ波長構造による新奇な電磁応答), 熊本, 9 月 25 日~9 月 28 日, (2009) (招待講演)

〔図書〕(計 2 件)

落合友四郎 他, 出版社:シーエムシー出版, メタマテリアル, 278 page, 13 章「クローキング媒質の設計方法」(分担執筆), p.136-147, ISBN-10: 4781303544, ISBN-13: 978-4781303543, 発売日:2012/06

落合友四郎 他, 出版社, エヌ・ティエー・エス、プラズモニクス ~ 光・電子デバイス開発最前線 ~, 297page, 第 6 章第 2 節「メタマテリアルによる光学迷彩技術」(分担執筆), p.269-280, ISBN-10: 4860433882, ISBN-13: 978-4860433888, 発売日:2011/08

6. 研究組織

(1) 研究代表者

落合 友四郎 (OCHIAI Tomoshiro)
大妻女子大学 社会情報学部 准教授
研究者番号: 60423034

(2) 研究分担者

ホセ ナチエル (Jose NACHER)
東邦大学 理学部 准教授
研究者番号: 60452984