



# Analysis of Macroscopic Cloaking Devices

Tanaka, Tatsuo

---

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2017-09-25

(Date of Publication)

2018-09-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第7009号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1007009>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



(別紙様式 3)

## 論文内容の要旨

氏 名 田中 健夫

専 攻 システム科学

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

Analysis of Macroscopic Cloaking Devices

(大規模クローキング素子の解析)

指導教員 的場 修

クローキングとは、物体の周囲に特殊な素子を配置し、光を曲げることによって、視覚的に対象を透明化する技術である。所謂、“透明マント”である。物体の周囲に配置する“透明マント”の働きをする素子をここでは、クローキング素子と呼ぶ。これまで、クローキングは、SF世界の産物だと考えられてきたが、2006年に、インペリアル・カレッジ・ロンドンのペンドリー教授らが、変換光学と呼ばれる理論に基づいて、クローキングが可能であることを証明して以降、注目を集めており、クローキング実現のための研究が進展している。特に、自動車の透明ビラー、ダビンチを代表とした手術用ロボットの手腕部の透明化、更には、太陽電池やLEDへの応用が、産業用途として期待されている。

クローキング素子の物性値である比誘電率テンソル $\epsilon$ 及び比透磁率テンソル $\mu$ は、変換光学によって決定することが可能であるが、そこで得られる $\epsilon$ と $\mu$ は、異方性かつ不均一性を持つ必要があることが知られている。一方、変換光学によって設計されたクローキング素子の性能評価には、 $\epsilon$ と $\mu$ の異方性と不均一性の両方を扱える、時間領域有限差分法のような波動光学法が主に用いられてきた。しかし、波動光学法によって、自動車のビラーのような大規模な物体用のクローキング素子を扱うことは、計算リソースの観点から、非常に困難である。そこで、 $\epsilon$ と $\mu$ の異方性と不均一性を扱え、かつ、大規模な物体も扱える唯一の手法として、ハミルトニアン形式光線追跡法が提案されており、近年、この方法を用いたクローキング素子の性能評価が実施されている。しかしながら、ハミルトニアン形式光線追跡法を用いたクローキング素子の評価は、球や円といった単純な形状に限られているのが現状である。その理由は、ハミルトニアン形式光線追跡法によって任意形状を扱うための2つの技術的課題、即ち、(i) 任意形状の表面を表現する方法の確立、(ii) 任意形状のクローキング素子内部における $\epsilon$ と $\mu$ を表現する方法の確立、が存在するためである。しかし、将来的に、様々な産業用途に対応したクローキング素子を設計・評価するためには、任意形状のクローキング素子をハミルトニアン形式光線追跡法によって扱える必要がある。

そこで、本論文では、上記の技術的課題を解決し、任意形状を扱える新規のハミルトニアン形式光線追跡法を提案した。また、その方法を用いることによって、世界で初めて、任意形状を有した大規模クローキング素子の解析に成功した。更に、ハミルトニアン形式

光線追跡法によって得られた解析結果を踏まえて、クローキング素子の性能を向上させる方法も提案した。

本論文は、6章で構成されており、以下に各章の概要を述べる。

第1章では、序論として、クローキング、変換光学、及びクローキング素子の設計・評価について解説し、本論文の目的を述べた。

第2章では、本論文で用いた計算手法について解説した。まず、クローキング素子中の光線経路を計算するための手法として、ハミルトニアン形式光線追跡法について説明した。次に、変換光学に基づいて、クローキング素子の $\epsilon$ と $\mu$ の分布を決定する方法について示した。そこでは、単純形状のクローキング素子における $\epsilon$ と $\mu$ が解析的に表現できるのに対し、任意形状では、解析的に表現することが困難であることを説明した。そこで、任意形状のクローキング素子の $\epsilon$ と $\mu$ を、解析的ではなく、数値的に求める方法として、変換光学と有限要素法を組み合わせた手法について解説した。この手法では、有限要素法によって解法する偏微分方程式を取り換えることによって、得られる $\epsilon$ と $\mu$ の分布を変化させることができる。微分方程式として、第4章では、ラプラス方程式を、また、第5章では、構造解析で用いられるナビエ方程式を採用した。

第3章では、表面の表現方法に関する課題を解決するために、表面メッシュ表現を採用したハミルトニアン形式光線追跡法を提案した。ここで、表面メッシュ表現とは、クローキング素子の表面を表現するために、メッシュを用いる表現形式である。一方、クローキング素子の表面を幾何学的関数で表現した従来の方式を、幾何学的関数表現と呼ぶことにする。メッシュ表現の妥当性を評価するために、球型クローキング素子と円柱型クローキング素子において、表面メッシュ表現と幾何学的関数表現の比較を実施した。その結果、メッシュの分解能を十分に高くすることで、表面メッシュ表現と幾何学的関数表現の結果を一致させることが可能であることが分かり、表面メッシュ表現の妥当性が示された。

第4章では、任意形状のクローキング素子内部における $\epsilon$ と $\mu$ の表現方法に関する課題を解決するために、フルメッシュ表現を採用したハミルトニアン形式光線追跡法を提案した。上述の表面メッシュ表現がクローキング素子の表面のみをメッシュで表現しているの

に対し、フルメッシュ表現では、クローキング素子の内部も含めてメッシュで表現する方式である。任意形状のクローキング素子の $\epsilon$ と $\mu$ は、変換光学と有限要素法を組み合わせた方法によって、数値的に決定されるので、メッシュ上の離散的な値によって表現される。そこで、離散的な $\epsilon$ と $\mu$ の分布をハミルトニアン形式光線追跡法に組み込むために、フルメッシュ表現を導入した。フルメッシュ表現の妥当性を評価するために、円柱型クローキング素子において、フルメッシュ表現と幾何学的関数表現の比較を実施した。その結果、メッシュの分解能を十分に高くすることで、フルメッシュ表現と幾何学的関数表現の結果を一致させることが可能であることが示され、フルメッシュ表現の妥当性が確認できた。そこで、任意形状の例として、ダブル円柱型クローキング素子及び大規模任意形状クローキング素子の解析を行い、任意形状においても、クローキングが成功することを示した。

第5章では、フルメッシュ表現を採用したハミルトニアン形式光線追跡法の活用事例として、 $\epsilon$ と $\mu$ の分布の設計によるクローキング素子の性能の向上について検討した。ここでは、 $\epsilon$ と $\mu$ の分布を変化させるために、偏微分方程式として、第4章で採用したラプラス方程式の代わりに、ナビエ方程式を採用した。ラプラス方程式では、偏微分方程式の係数において変化させる余地はないが、ナビエ方程式では、係数であるヤング率の分布を変動させることによって、 $\epsilon$ と $\mu$ の分布を変化させることができる。そこで、異なるヤング率分布に対して円柱型クローキング素子の $\epsilon$ と $\mu$ の分布を計算し、それぞれにおいて、ハミルトニアン形式光線追跡法によって性能を評価した。評価の結果、 $\epsilon$ と $\mu$ の分布を変化させることによって、クローキング素子の性能が向上することが示された。更に、第4章で解析した大規模任意形状クローキング素子においても、 $\epsilon$ と $\mu$ の分布の調整によるクローキング性能の向上を確認した。

第6章では、本論文の結論と今後の課題について述べた。

以上に述べたように、本論文では、ハミルトニアン形式光線追跡法によって任意形状を扱うための2つの技術的課題、即ち、表面を表現する方法の確立、及び、クローキング素子内部における $\epsilon$ と $\mu$ を表現する方法の確立を解決することによって、任意形状を扱うことが可能な新規のハミルトニアン形式光線追跡法を提案し、任意形状を有した大規模クロ

(氏名： 田中 健夫 NO. 4 )

ーキング素子の解析に成功した。この方法によって、産業用途に応じたクローキング素子を、形状に囚われずに自由に設計し、評価することが可能になった。また、実際のクローキング素子の作製では、加工技術の実現できる分解能に応じて、離散的に $\epsilon$ と $\mu$ を設定する必要があるため、メッシュの分解能を考慮できるフルメッシュ表現は、実際の作製を踏まえてクローキング素子を設計する上で、非常に有用であると期待される。更に、本論文で提案した $\epsilon$ と $\mu$ の分布の設計によるクローキング性能の向上方法によって、有限の分解能を有したクローキング素子において、最大限の性能を引き出すことが可能になった。

クローキング素子を実現するために解決すべき今後の課題としては、(i) 所望の $\epsilon$ と $\mu$ を実現するメタマテリアルの設計、(ii) クローキング素子の中に、所望の $\epsilon$ と $\mu$ を有したメタマテリアルを配置するための加工技術の実現の 2 つが挙げられる。(i)については、既存の波動光学法によって設計可能であるが、可視光領域では、メタマテリアルを構成する金属による損失が大きいことが問題となっている。損失の問題を解決するために、損失の小さい誘電率を用いたメタマテリアルや利得物質を用いた損失の補償も提案されているが、可視光領域における低損失のメタマテリアルの設計は未だ実現していない。この問題を根本的に解決するためには、新規の低損失な負透磁率物質を合成する必要があると考えられる。

(ii)については、一つの組の $\epsilon$ と $\mu$ を均一に実現するメタマテリアルの作製については検討が進められているが、 $\epsilon$ と $\mu$ の分布を再現するように、メタマテリアルを配置する検討はほとんど実施されていないのが現状である。一方、本研究から、高いクローキング性能を発現させるためには、100 $\mu\text{m}$ 以下の分解能が必要であることが示されたが、近時の半導体プロセスで用いられるアライメント技術の位置合わせ精度は、数 nm であるので、この技術によって必要な分解能を実現することは可能だと考えられる。しかしながら、電子線リソグラフィ、ナノインプリント、レーザー直接描写等のメタマテリアルを作製するために用いられる加工技術の多くが、半導体プロセスの中に組み込まれていない。従って、(ii)の技術課題を解決するためには、メタマテリアルの作製技術と半導体プロセスにおけるアライメント技術の連結が必要であると考えられる。

氏名	田中 健夫		
論文 題目	Analysis of Macroscopic Cloaking Devices (大規模クローキング素子の解析)		
審査 委員	区分	職名	氏名
	主査	教授	的場 修
	副査	教授	佐野 英樹
	副査	教授	太田 能
	副査	准教授	仁田 功一
	副査		
要 旨			
<p>近年、透明マントで代表されるように、光を回り込みさせて物体を透明化して障害物としての影響を排除するクローキング素子が注目されており、その応用として、車のビラーによる視覚デットゾーンの除去や遠隔手術ロボットの透明化などが検討されている。工学的応用を実現するためには、大規模なクローキング素子の特性評価が必要であり、また製造時における作製精度を考慮するために離散的表現が必要となる。本論文では、クローキング素子の大規模解析及び離散的表現を可能にする解析手法の提案とクローキング性能特性を改善する手法について新規な提案を行ったものである。博士論文は6章で構成されている。以下に各章の内容を要約する。</p> <p>第1章では、序論として、クローキング素子を紹介し、比誘電率テンソル及び比透磁率テンソルを決定する変換行列、及びクローキング素子の設計・評価方法について説明している。また、研究目的について述べている。</p> <p>第2章では、本論文での基本的計算法であるハミルトニアン形式の光線追跡法を紹介している。さらに変換行列を用いてクローキング素子の比誘電率テンソル及び比透磁率テンソルを決定する方法を紹介している。これまでに球や円柱などの単純な形状については解析表現が可能であるが、任意形状では解析的表現が困難であることを説明し、任意形状における評価手法として数値解法の一つである、変換行列と有限要素法を組み合わせた方法を紹介している。</p> <p>第3章では、離散化表現の第1の方法としてクローキング素子の表面をメッシュ表現したハミルトニアン形式の光線追跡法を提案している。メッシュ表現によるクローキング性能を幾何学的関数による表現と比較している。球型及び円柱型クローキング素子においてメッシュ表現の解像度を変えた計算結果の比較から十分なクローキング性能が得られることを実証している。</p> <p>第4章では、任意形状のクローキング素子の比誘電率テンソル及び比透磁率テンソルの3次元離散表現を実現するために、第3章での表面に加えて内部もメッシュ表現するフルメッシュ表現によるクローキング素子の性能評価を行なっている。はじめに円柱型クローキング素子においてフルメッシュ表現と幾何学的関数表現によるクローキング性能が一致させることが可能であることを実証している。次に、任意形状への拡張として、2つの円柱を組み合わせたダブル円柱型クローキング素子の性能評価を行なっている。任意形状のクローキング素子の性能評価は世界初の研究成果である。</p> <p>第5章では、第4章で得られたフルメッシュ表現のクローキング性能を向上させる手法について提案している。比誘電率テンソル及び比透磁率テンソルは変換行列と有限要素法を組み合わせることで数値的に求められる。有限要素法で解法する偏微分方程式を選択することで得られる比誘電率テンソル及び比透磁率テンソルが変わる。本章では、偏微分方程式としてナビエ方程式を採用し、ナビエ方程式の係数であるヤング率分布を変動させることで、得られるクローキング性能を評価している。数値計算の結果、素子の解像度とヤング率によってクローキング性能を向上させることができています。</p> <p>第6章では、本論文で得られた成果をまとめている。</p> <p>本論文は、実用化に向けて大規模なクローキング素子の評価及び設計に対する新規な技術を提案し、その有効性を実証したものであり、応用光学分野において新規な応用分野の開拓に繋がるものとして提案手法の有用性が認められる。提出された論文はシステム情報学研究科学位論文評価基準を満たしており、学位申請者の田中健夫は、博士(工学)の学位を得る資格があると認める。</p>			