

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06019

研究課題名(和文) 誘電性と磁性を併せ持つ小型粒子で構成される負屈折率媒質レンズとそのサブ波長分解能

研究課題名(英文) Negative refractive index material lens composed of small particles with both dielectric and magnetic properties and the sub wavelength resolution

研究代表者

久保 洋 (Kubo, Hiroshi)

山口大学・大学院創成科学研究科・教授

研究者番号：50205126

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：複数の金属柱からなる単位セルを六法格子状に並べて負屈折率媒質を構成しレンズを製作した。このレンズのリフォーカス点における結像分布は回折限界の分布と比べて広がりが74%程度に抑えられていた。最終年度作成の1/6の媒質では位相分布は歪んでいるが分布は小さくなった。伝搬波によるリフォーカス点への収束効果は下がったものの小型セルにしたことでエバネセント波による効果がそれを補う以上に効いているものと考えられる。負屈折率媒質レンズにより高い解像度で結像させるためにエバネセント波の働きが大きいことが示された。

研究成果の概要(英文)：Unit cells of a plurality of metal columns are arranged in a hexagonal lattice pattern to construct a negative refractive index material and lenses are manufactured. The spread of the imaging distribution at the refocus point of the lens manufactured last year was suppressed to about 74% compared to the distribution of the diffraction limit. The phase distribution was distorted but the distribution became small. Although the convergence effect on the refocus point by the propagating wave decreases, it is thought that the effect of the evanescent wave is more effective than compensating for it by making it into a small cell. It was shown that the evanescent wave worked greatly to form an image with a high resolution by the negative refractive index medium lens.

研究分野：電磁波工学

キーワード：負屈折率媒質 メタマテリアル リフォーカス

1. 研究開始当初の背景

(1) 負屈折率媒質という自然界にはない特性を実現するメタマテリアルが提案されている。この媒質は負の屈折率という特異な特性を持ち、多くの関心を集めている。負屈折率媒質のレンズを用いると、エバネセント波の見かけの増幅により近傍界の伝搬が可能になる。これにより、参照光の波長のオーダーに制限されていた従来のレンズの解像度を超え、サブ波長の分解能を持つレンズが得られるとされている。これまで種々の負屈折率媒質が提案、試作され、幾つかの媒質ではレンズによる結像が測定され、解像度が調べられている。媒質設計におけるアプローチの一つは、誘電性及び磁性の特性を示す素子を交互に周期的に並べて媒質を構成する。この方法では比較的自由空間の電磁波との整合がとりやすい。しかし誘電性と磁性の2種類の素子が必要で、特に磁性素子の形状は複雑で寸法も大きく、セルも大きくなる。これまでマイクロ波領域において負屈折率レンズの特性が測定されているが、波長限界を僅かに超える程度の結像しか得られていない。またサブ波長分解能におけるエバネセント波の効果についても詳細な議論は行われていない。

2. 研究の目的

(1) 複数の円柱形状導体だけで構成され、誘電性と磁性を併せ持つメタマテリアル素子構造を提案する。この単位セル素子の小型化を行い、これを用いて2次元負屈折率媒質を構成し、レンズを試作する。単位セルの小さな媒質において結像の電磁界を測定し、これまで確認されていないエバネセント波のサブ波長分解能への影響を検証する。

3. 研究の方法

(1) 単位セルを小型化するために媒質を円柱導体だけで構成する。この構造で屈折率を負にするために電磁界シミュレーションにより特性を調べ以下の設計を行う。誘電率と透磁率が同時に負となる特性を設計し、円柱導体の軸方向に沿った共振の周波数、隣接する円柱導体間の共振の周波数を下げることによって、負屈折率特性が得られる周波数帯域を波長に対して相対的に下げ、単位セル素子の小型化を行う。

(2) 単位セルの透過、反射係数から等価誘電率、透磁率を求め、これを参考に媒質のインピーダンスを設計し自由空間との整合をとる。

(3) 2次元媒質を試作し、この媒質で薄いレンズを試作し、これを透過した電磁波の電界分布を測定し、結像の広がりからレンズの分解能を調べる。

4. 研究成果

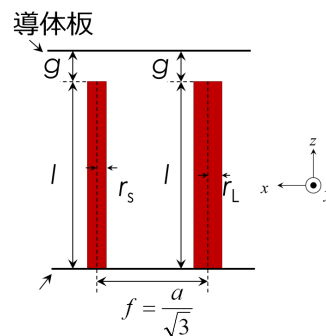


図1(a) 誘電性、磁性粒子の構造

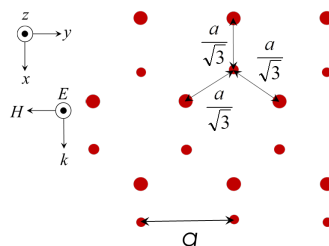


図1(b) 円柱導体の配置

(1) 円柱導体を用いて誘電性、磁性粒子を構成した。図1(a)に示すように2枚の導体平板の間に、2種類の半径の金属円柱をおいている。それぞれの円柱は半径が一定である。(b)に示すようにこれらは六角格子状に並んでいる。これらの円柱は下面の金属板に置かれており、その先端からギャップ  $g$  だけ離れて金属板に覆われている。円柱はインダクタンスを持ち、ギャップはキャパシタンスを持つ。円柱単体では誘電性素子として働き、2種類の円柱ペアで磁性素子として働く。それぞれの共振周波数を超えると、加えられる電界と逆位相の電荷がたまり、磁界と逆位相の電流が流れ、それぞれの等価誘電率、等価透磁率は負となる。この構造において形状パラメータを調整したとき伝搬するモードの分散特性は例えば図2のようになる。下から2番目のモードは左手系モードになっており、この構造が負屈折率媒質として働いていることがわかる。この例では、屈折率が-1となるエアラインと交差する周波数において波長は103mmである。これに対してセル寸法は  $a = 17 \text{ mm}$  であるので、波長の約1/6になっている。

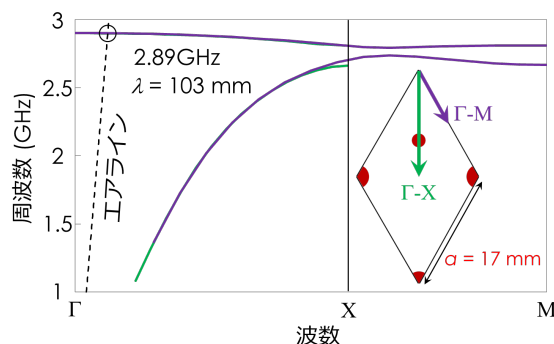


図2 分散特性

(2) 媒質への透過係数, 反射係数から等価誘電率, 透磁率を求めインピーダンスを計算すると誘電率が大きく, インピーダンスを調整することで外部空間との整合をとることは難しかった. これに変わる措置として媒質の外側に別寸法の円柱を置き, その位置と長さを調整することで整合をとった. 金属円柱を短くし左手系モードの伝搬周波数を上げると整合が取れやすくなり反射係数が下がる. 5 GHz 付近では-10dB 以下になる. 図 2 で分散特性を示した媒質に整合用円柱を置いたときの透過, 反射係数を図 3 に示す. この媒質は円柱を長くし周波数を下げているため整合がとりにくい条件であるが, 反射係数は-4.5dB 以下の値が得られている.

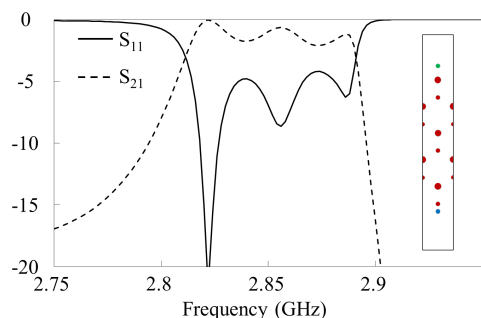


図 3 透過, 反射特性

(3) 金属円柱の長さや設置位置を変えることで波長の 1/10 以下のセルも設計したが, 左手系の帯域が狭くなり測定が難しくなる. またセルを小さくすると整合を取りにくくなった. 本研究では波長の 1/3 のセルと 1/6 のセルで構成される 2 種類の媒質で平面レンズを試作した. レンズの左側からプローブで励振された円筒波を入射させる. 円筒波はレンズ左側境界で負の角度方向に屈折し, レンズ中で焦点を結ぶ. さらに右側境界で負の角度方向に屈折し, レンズから出射した後で再び焦点を結ぶ. これが伝搬波による結像である. 一方, 負屈折率媒質ではエバネセント波の増幅現象が予想されており, 波数の大きな非伝搬波が媒質内で見かけの増幅を受けることで, レンズの右外の領域まで到達する. これが加わることで伝搬波だけでは得られない回折限界を超えた結像となる.

図 4(a) はレンズ右外の領域における電界の大きさ, (b) は位相の分布図である. (a) の分布において大きさが最大の点に+の印を (a), (b) の分布図に付けている. (b) における黒線は等位相の点を表しており, +の印の付近から右側に曲面が形成され電磁波が周囲に広がっていることが分かる. この図の左側にあるレンズを通過した電磁波が+の点に集まっていることが分かる. また+の点を通る y 軸に平行な直線に沿って電界の大きさの分布から結像の広がりを調べると, 回折限界に比べて 74%に抑えられていた. この電界分布はセルが波長の 1/6 のレンズによるものである. これに対して, ここには示していな

いが, セルが波長の 1/3 のレンズからの電界の位相分布では等位相の各線が同心円を形成し, 伝搬波が焦点へきれいに集まっている. これは外部領域との整合が良くとれているため屈折角の大きな伝搬波も集まっているためである. しかし電界最大点周辺の結像の広がり大きい. セルが波長の 1/6 のレンズでは伝搬波によるリフォーカス点への収束効果は下がったものの小型セルにしたことでエバネセント波による効果がそれを補う以上に効いているものと考えられる. 負屈折率媒質レンズにより高い解像度で結像させるためにエバネセント波の働きが大きいことが示された.

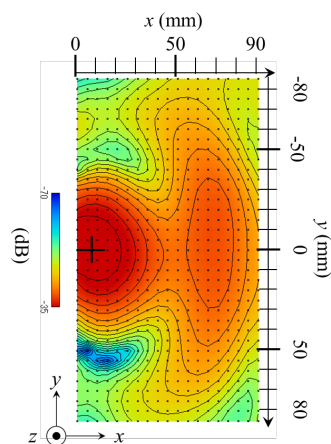


図 4(a) レンズ出射側領域の電界 (大きさの分布)

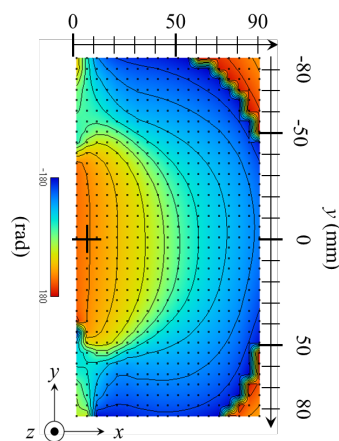


図 4(b) レンズ出射側領域の電界 (位相の分布)

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 9 件)

① 上ヶ迫 誠、久保 洋、山本 綱之、互い違いに配置された金属の円柱と角柱で構成される負屈折率媒質とその伝搬特性、平成 29 年電気・情報関連学会中国支部連合大会論文集、2017

② 上ヶ迫 誠、北川 幸平、久保 洋、山本 綱之、3 枚の金属片で構成される負屈折率媒質の分散特性と共振モード、第 19 回 IEEE 広

島支部学生シンポジウム講演論文集、査読有、B1-7、169-171、2017

③山本綱之、久保 洋、福嶋 崇嗣、真田 篤志、金属パターンが付加された誘電体円柱を六方格子状に配置した異方性の非常に小さな2次元負屈折率媒質、電子情報通信学会論文誌、査読有、J99-C、579-586、2016

④村田 真成、久保 洋、山本 綱之、コムライン型の金属円柱で構成される二次元負屈折率媒質と特性測定、第18回 IEEE 広島支部学生シンポジウム講演論文集、査読有、A2-18、58-60、2016

⑤村田 真成、久保 洋、山本 綱之、平行平板中に置かれた円柱で構成される負屈折率媒質と特性測定、平成28年電気・情報関連学会中国支部連合大会論文集、査読無、2016

⑥貞升 翔吾、久保 洋、真田 篤志、山本 綱之、金属円柱が互い違いに配置された導波管型線路における右手系及び左手系モードの伝搬特性、2015年電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会論文集、査読無、2015

⑦久保 洋、村田 真成、真田 篤志、山本 綱之、金属円柱がコムライン型に配置された左手系媒質とその伝搬特性、平成27年電気・情報関連学会中国支部連合大会論文集、査読無、2015

⑧貞升 翔吾、久保 洋、真田 篤志、山本 綱之、金属円柱が互い違いに配置された導波管型右手/左手系複合線路の伝搬と放射特性、平成27年電気・情報関連学会中国支部連合大会論文集、査読無、2015

⑨久保 洋、貞升 翔吾、真田 篤志、山本 綱之、金属円柱が互い違いに配置された導波管型右手/左手系複合線路におけるモードの伝搬特性、電子情報通信学会論文誌、査読有、J98-C、451~452、2015

[学会発表] (計 7件)

①上ヶ迫 誠、北川 幸平、久保 洋、山本 綱之、3枚の金属片で構成される負屈折率媒質の分散特性と共振モード、第19回 IEEE 広島支部学生シンポジウム、島根大学(島根県・松江市)、2017年12月2日

②上ヶ迫 誠、久保 洋、山本 綱之、互い違いに配置された金属の円柱と角柱で構成される負屈折率媒質とその伝搬特性、平成29年電気・情報関連学会中国支部連合大会、岡山理科大学(岡山県・岡山市)、2017年10月21日

③村田 真成、久保 洋、山本 綱之、コムラ

イン型の金属円柱で構成される二次元負屈折率媒質と特性測定、山口大学(山口県・宇部市)、2016年11月19日

④村田 真成、久保 洋、山本 綱之、平行平板中に置かれた円柱で構成される負屈折率媒質と特性測定、広島大学(広島県・東広島市)、2016年10月22日

⑤貞升 翔吾、久保 洋、真田 篤志、山本 綱之、金属円柱が互い違いに配置された導波管型右手/左手系複合線路の伝搬と放射特性、平成27年電気・情報関連学会中国支部連合大会、山口大学(山口県宇部市)、2015年10月17日

⑥久保 洋、村田 真成、真田 篤志、山本 綱之、金属円柱がコムライン型に配置された左手系媒質とその伝搬特性、平成27年電気・情報関連学会中国支部連合大会論文集、山口大学(山口県宇部市)、2015年10月17日

⑦貞升 翔吾、久保 洋、真田 篤志、山本 綱之、金属円柱が互い違いに配置された導波管型線路における右手系及び左手系モードの伝搬特性、2015年電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会、東北大学(宮城県仙台市)、2015年9月9日

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

○取得状況 (計 0件)

[その他]

無し

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

久保 洋 (KUBO, Hiroshi)

山口大学・大学院創成科学研究科・教授

研究者番号：50205126

### (2) 研究分担者

無し ( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

無し ( )

研究者番号：

### (4) 研究協力者

無し ( )