

機関番号：13201

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560319

研究課題名(和文) 全方向型負性屈折率媒質と光領域スーパーレンズの創生

研究課題名(英文) Realization of the isotropic negative refractive index materials and optical super lenses

研究代表者

藤井 雅文 (Masafumi Fujii)

富山大学 大学院理工学研究部(工学)・准教授

研究者番号：60361945

研究成果の概要(和文)：光領域において負の屈折率をもつ物質を、金属ナノ球の赤外光照射による準規則配列の生成効果を用いて実現するため、光誘起力の数値解析を行った。光領域における金属微小球中の電子プラズマ振動(局在表面プラズモン)の性質と、それらに光照射された場合の力学的作用を明らかにした。また準規則配列構造が負の屈折率特性を実現する可能性について、マイクロ波領域における実験により確認した。

研究成果の概要(英文)：For the realization of the negative refractive index materials in the optical region with the semi-periodical arrays of metal nano-spheres, optical forces have been analyzed under the illumination of infrared light. The property of electron plasma oscillation (localized surface plasmon) and the mechanical effects have been clarified on the metal nano-spheres. In addition, the realization of the negative refractive index in optical region has been confirmed by the semi-periodical structures in microwave experiments.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：波動利用工学・負性屈折率媒質

1. 研究開始当初の背景

Veselago による負屈折率媒質中の電磁波伝搬理論に始まり、Pendry による完全レンズの理論的検討、Fang らによるエバネッセント波(非伝搬波)に対する銀薄膜のスーパーレンズ効果の実証により、負の屈折率をもつ物質はもはや理論上のものでなく、電磁波工学の常識を覆す現実の物質となっている。Fang らは、波長 365nm の紫外線を用いて、銀薄膜の完全レンズ効果により分解能約 60nm での撮像が可能であることを実証した。

その後 Pendry, Smith らにより電磁波クロッキング(cloak は「覆い隠す」の意。サイエンスフィクションにおける透明人間のマントのような効果)の理論とマイクロ波での実験など、興味深い研究結果が報告され、社会的にも大きなインパクトを与えた。現在、赤外領域における負性屈折率媒質を半導体微細プロセスによって作成しようとするなど、活発に研究が行われている。しかし、金属の誘電率の波長依存性と損失、負の透磁率の実現が困難であること、解析設計の困難さ、そ

の他微細加工等の要因により、3次元的に負の屈折率をもつ媒質による光領域完全レンズはまだ実現されていない。

2. 研究の目的

このような状況において、光の回折限界をはるかに超える解像度をもつ負屈折率完全レンズを実現することが本研究の最終的な目標である。特に、光領域においては波長以下の微細構造が必要になりこれを大規模に効率よく実現する方法として、ナノ金属粒子の自己配列効果を利用することが考えられる。

本研究では、

- (1) 波長よりも微細な金属粒子に光照射することによって生じる力学的作用を明らかにし、さらにこのような粒子がクラスターを形成する効果を明らかにする。
- (2) そして、そのクラスター群が自己配列した場合の準周期構造中の光や電磁波の伝搬特性を明らかにする。

さらに今後、これらの研究成果をもとに、実際に光メタ材料の創製に向け研究を推進していく予定である。

3. 研究の方法

(1) 光照射による金属粒子の力学的作用

光領域における金属の性質を精度良く解析する数値手法に、有限差分時間領域法 (Finite-Difference Time-Domain, FDTD 法) がある。研究代表者はこの手法を用いて独自に数値解析プログラムを作成し、様々な応用に用いてきた。これにさらに金属の複素誘電率を広い周波数範囲でモデル化した結果と組み合わせることにより、任意の形状、多種類の金属、半導体、誘電体材料に対して、柔軟に光や電磁波の伝搬現象の解析を可能とした。

本研究において、微小な球状の金属粒子に対して光を照射した場合の、粒子間に作用する引力や斥力などの力学的効果を正確に解析するためのプログラムを付加した。プログラムの検証のため、理論解の得られている球に対する平面波状の光の放射圧を計算した。次に、本解析プログラムを用いて、金属の微小粒子に光を照射した場合の電磁気学的効果として、粒子表面の電子が光と結合し、プラズマ波として観測される表面プラズモンの共鳴現象について詳しく解析し、どの光波長において表面プラズモンが最も強く励起され、それによってどの程度の強さの力学的効果が得られるのかを定量的に調べた。光照射によって微小粒子がなんらかの規則的な力を受け、それによって粒子や粒子群の配列が自己生成過程のもとで制御可能であるかを検討した。[参考文献：業績②]

(2) 左手系ランダム媒質の電磁波伝搬

上記のような微小粒子の自己配列効果によって生成される準周期構造が、その中を伝搬する光や電磁波に及ぼす影響や効果について検討するため、先ず実験の容易なマイクロ波領域において、左手系2次元伝送線路を基板上に構築し、さらに、人為的に数種類のランダム配列をその基板上に導入した。このようなランダム系について電磁波の伝搬現象を実験的に検証した。負の屈折率をもつランダム媒質中の電磁波伝搬を定量的に評価した研究は研究代表者の知る限りこれが初めてである。[参考文献：業績①]

左手系2次元伝送線路の製作において、図3.2.1に示すように右手系に挟まれた左手系領域においてコイル (L) とコンデンサ (C) を誘電体基板にハンダ付けしてネットワーク状に形成する。次に、波源の位置に測定機 (ネットワークアナライザ) の入力端子を接続して信号を入力する。この形状の伝送線路ではTEモードが伝搬することがわかっており、その電界の向きは基板に対して垂直方向である。この基板直上の電界を開口型プローブにより検出し、ネットワークアナライザの出力端子へ導く。図3.2.2には、実際に作製したサンプルの写真を示す。このような系を用いて、コンデンサ (C) の値を特定の偏差で不規則に配置したランダムなネットワークにおける電磁波の伝搬を定量的に評価した。

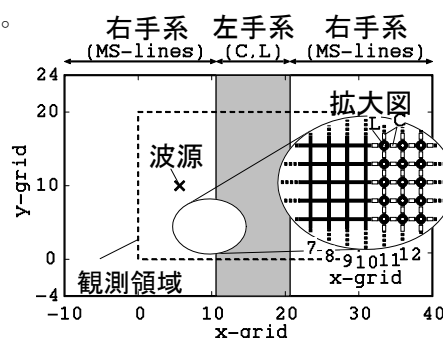


図 3.2.1 左手系サンプル構成

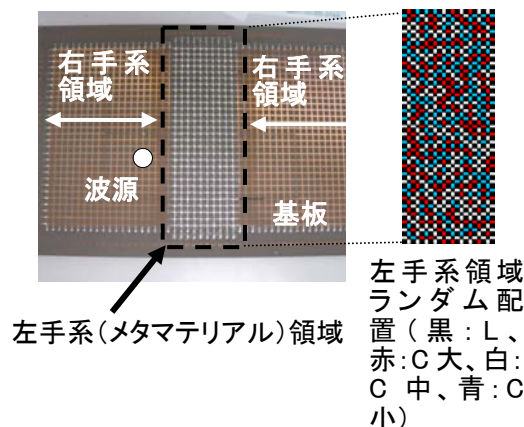


図 3.2.2 左手系サンプル外観

4. 研究成果

(1) 照射による金属粒子の力学的作用

半径 20nm~200nm の銀ナノ球がクラスター（複数の粒子の凝集体）を形成する場合について、共鳴波長における照射時の粒子間に作用する引力あるいは斥力を解析した。特に、図 4.1.1 および図 4.1.2 に示す形態等について数値解析を行った。その結果、銀ナノ粒子では球半径 20nm、共鳴波長のレーザー光出力 10mW、レーザー光スポット面積 $10\mu\text{m}^2$ の場合に最大約 1pN の引力が誘起されることが明らかになった。さらに、これらのクラスターの規則配列は負の屈折率をもつことが同様の数値解析から推察された。これにより、金属ナノ球に照射することで負の屈折率をもつ光メタ材料を効率よく作製できる可能性が示された。

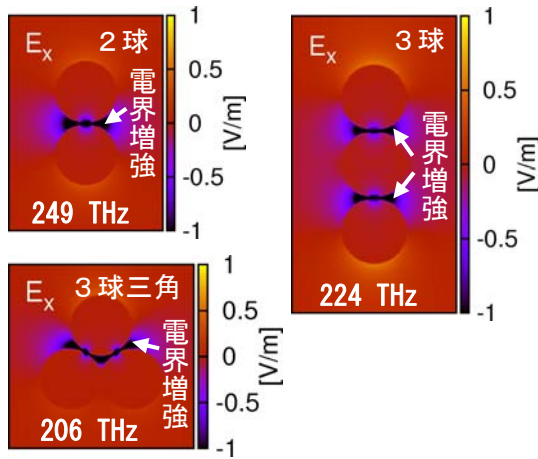


図 4.1.1 銀球（半径 20nm）クラスターの形態による基底プラズモン共鳴モードの電界分布。図中、白数字はクラスターの共鳴周波数。

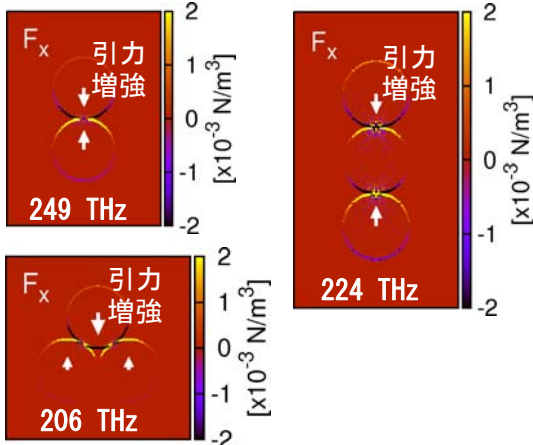


図 4.1.2 銀球（半径 20nm）クラスターの形態による基底プラズモン共鳴モードの赤外光誘起引力分布。

(2) 左手系ランダム媒質の電磁波伝搬

上記の金属ナノクラスターを構成単位とする光メタ材料を、照射による自己整合的な手法で生成させ得る可能性が示唆された。このような自己配列効果を利用すると、準周期的あるいはランダムな配列となることが予想されこのようなランダム配列した共振器群の中を伝搬する電磁波の特性を解析した。

今回の検討では、コンデンサの容量値の偏差が 50% のランダム配置であっても、周期配列中とほぼ同様の電磁波伝搬の様子が観測された。その結果を図 4.2.1 および図 4.2.2 に示す。これらの結果からは左手系媒質中ではランダム媒質の影響は予想以上に小さいことが推察された。このことは、光メタ材料については、より柔軟かつ低コストの製造方法が採用できることを示唆している。

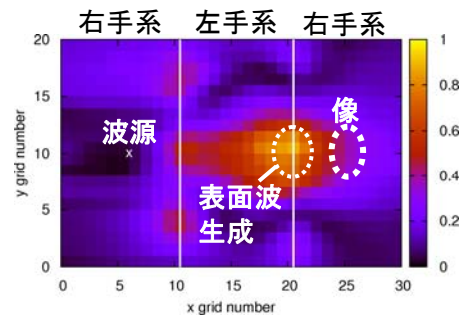


図 4.2.1 周期的配列（誘電率偏差 0%）

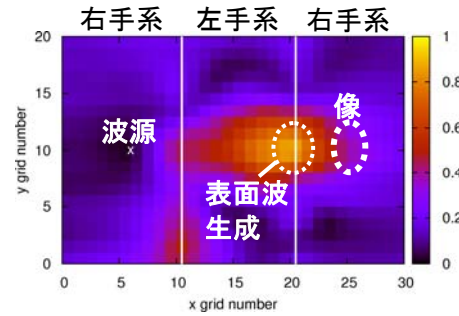


図 4.2.2 ランダム配列（誘電率偏差 50%）

以上のように、金属ナノ粒子への照射によるランダム光メタ材料の作製の可能性を示すことができました。これらの結果をさらに発展させ、これまでよく知られていなかったナノ粒子の光動力学と、ランダム媒質中の光や電磁波の伝搬現象を明らかにして行く予定である。

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4件)

- ① M. Fujii, "Retained Sub-Diffraction-Limit Resolution in 2D Random Transmission Line Left-Handed Lenses", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 21, no. 10, pp. 540-542, 2011. 査読有
- ② M. Fujii, "Finite-difference analysis of plasmon-induced forces of metal nano-clusters by the Lorentz force formulation", *Optics Express*, vol. 18, no. 26, pp. 27731-27747, Dec. 2010. 査読有
- ③ M. Fujii, W. Freude, and J. Leuthold, "Dispersion relation and loss of sub-wavelength confined mode of metal-dielectric-gap optical waveguides", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 21, no. 6, pp. 362-364, Mar. 2009. 査読有
- ④ M. Fujii, W. Freude, and J. Leuthold, "Numerical prediction of minimum sub-diffraction-limit image generated by silver surface plasmon lenses", *Optics Express*, vol. 16, no. 25, pp. 21039-21052, Dec. 2008. 査読有

[学会発表] (計1件)

- ① M. Fujii, "Numerical Prediction of Minimum Sub-Diffraction-Limit Image Resolved by Silver Surface Plasmon Lenses", *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, Baltimore, Maryland, USA, June 1-5, paper no. JThE122, 2009. 査読有

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]

ホームページ

<http://www3.u-toyama.ac.jp/densou01/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤井 雅文 (FUJII MASAFUMI)

富山大学・大学院理工学研究部・准教授

研究者番号：60361945

(2) 研究分担者

()

該当なし

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

該当なし

研究者番号：