様式 C-19

科学研究費補助金研究成果報告書

平成 21 年　6 月　10 日現在

研究種目：若手研究（B）
研究期間：2007～2008
課題番号：19760246
研究課題名（和文）　メタマテリアルの効率的な構造の検討

研究課題名（英文）　Developing　efficient metamaterial structure

研究代表者
有馬　卓司　（ARIMA　TAKUJI）
東京農工大学・大学院共生科学技術研究院・講師
研究者番号：20361743

研究成果の概要：本研究では，誘電率が負になるメタマテリアルの効率的な構造の開発を目的とした．これまでの構造は，誘電体基板を隙間を開けながら何層も組み合わせるという構造であり製造および使い勝手の面から見て決して良いとはいえないものであった．本研究では，格子構造に着目し，格子構造に金属球を付加することで，負の誘電率が実現できることを数値シミュレーションにより確かめた．開発した構造は，等方性であり，これまでの構造の様に強い異方性を示すこともなく非常に使いやすいと考えられる．なお，マテリアルとして負の透磁率を示す媒質の開発も進められており，本研究で開発した格子構造型メタマテリアルと組み合わせることで，DNG 媒質の実用的なデバイスの開発が期待できる．

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合　計
2007 年度	900,000	0	900,000
2008 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総　計	1,800,000	270,000	2,070,000

研究分野：工学
科研費の分科・細目：通信・ネットワーク工学
キーワード：DNG マテリアル，数値電磁解析，FDTD 法，周期構造体

１．研究開始当初の背景

メタマテリアルとは，自然界には存在しない電気的特性を人工的な構造を用いることで実現した媒質の総称である．負の屈折率を示す DNG（Double NeGative）媒質などはその一例である．これまでアンテナ分野において，メタマテリアルの応用例がいくつか報告されているが，提案されたメタマテリアルの多くが 2 次元的な構造であることから，その応用の幅が限られている．　さらにこれまで提案されているメタマテリアル構造は誘電体基板を電波の入射方向に垂直に配置するものであり製造の面でも困難であった．さらにこの構造では，強い異方性を示すため，平面波に対しては有効だが，一般的な波源から放射される球面波には適応できないという欠点があった．これらを克服する効率的なメタマテリアル構造の開発が望まれていた．

２．研究の目的

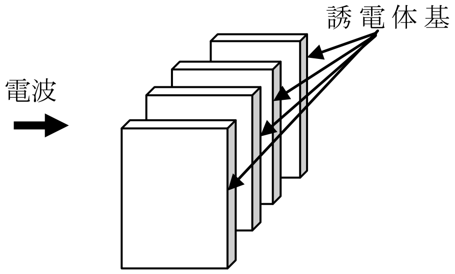
本研究では,3 次元構造による等方的な扱いやすいメタマテリアルの実現を目的とし,それ実現する効率的な構造について検討を行う．前述したようにこれまでの構造は，誘電体基板を何枚も組み合わせるものであった．この構造は非常に作成が困難であるため，これが実用化の障害になっていることは確かである．本研究ではシンプルな構造で効率的にメタマテリアル特性を示す構造の開発を目的とする．

３．研究の方法

本研究では，下記（1)～(3)を用いて研究を行った．

(1)効率的な構造の検討

これまでの構造は，図ａのように電波の入射方向水平に置かれた基板上に金属ワイヤと金属リングの組み合わせを配置することによりメタマテリアル構造を検討していた．



図ａ従来構造メタマテルアル

本研究ではこれまでのアプローチとは異なり，分子構造を模擬することとした．金属などは光の領域では負の誘電率を示すことが知られている．これは，金属の分子構造が面心立方格子構造であり，この構造が可視光や近赤外の領域においてプラズマ共振を起こす.そして,プラズマ共振の起る周波数以下に誘電率が負になる領域が存在するためである.本研究では,マイクロ波領域において,金属ワイヤにより作成された格子構造型のメタマテリアルの開発を検討した．格子構造は金属メッシュで表現できるため，作成も比較的容易と考えた．

(2)FDTD 法を用いた数値解析

メタマテリアル構造の有効性を検討するために本研究ではスーパーコンピュータを用いた大規模シミュレーションを積極的に行い効率的な開発を目指した．この解析には FDTD 法を用いた．FDTD 法とは Finite Difference Time Domain の略であり時間領域でマクスウエルの方程式（微分形）

$$\nabla \times \boldsymbol{E}(\boldsymbol{r}, t) = -\frac{\partial \boldsymbol{B}(\boldsymbol{r}, t)}{\partial t}$$

$$\nabla \times \boldsymbol{H}(\boldsymbol{r}, t) = \frac{\partial \boldsymbol{D}(\boldsymbol{r}, t)}{\partial t} + \boldsymbol{J}(\boldsymbol{r}, t)$$

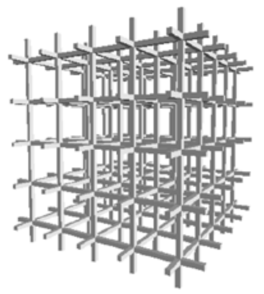
を差分化して解析する手法である．

また，本研究で検討している構造は分子構造を模擬しているために，周期構造になる．FDTD 法では一般に有限の空間を解析するために，大きな周木構造の解析には工夫が必要である．そこで本研究では，周期構造中において,電磁界はつぎの Bloch の境界条件

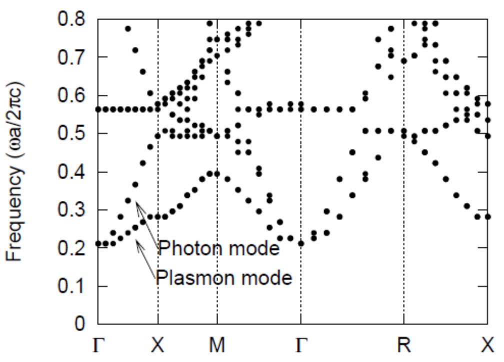
$$\mathbf{E}(\mathbf{r}+\mathbf{a}) = e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{a}}\mathbf{E}(\mathbf{r})$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}+\mathbf{a}) = e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{a}}\mathbf{H}(\mathbf{r})$$

を満すことに注目した．ここで，ここで，**r** は位置ベクトル，**a** 格子ベクトル，**k** は波数ベクトルを表す， すなわち，計算領域を周期構造の一つの単位セルとし,その側壁に Bloch の境界条件に適用することで,無限周期構造中の電磁界を計算することができる．具体的には．はじめに Bloch の波数ベクトル **k** を設定し,解析領域内に x,y,x 各方向に微笑ダイポールアンテナを用いて，ガウスパルスを励振する．そして，解析領域内に設けた観測点により定常状態になった後の電界を記録する.この記録した電界の時間変化をフーリエ変換すると,設定した波数ベクトルに対応する固有周波数がピークとして検出される.この作業を **k** に沿って繰り返すことで, 周期構造と電波の入射波による誘電率の関係を示すチャート（バンド構造と呼ばれる）を求めることができる．下記に図ｂの格子構造のバンド構造解析結果（図ｃ）を示す．



図ｂ金属ワイヤによる格子構造



図ｃ格子構造のバンド構造

なお，図 c 中でΓ，X，M，R とは図 d に示す周期構造中の対象性の高い点に波数ベクトル **k** を設定していることを示す.

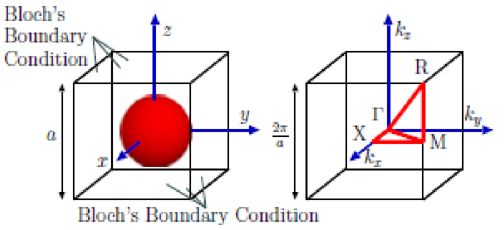


図 d 波数空間

(3) 実験的検討

予備的実験とし，研究代表者所属機関所有の電波暗室，信号発生器，スペクトラムアナライザ，ネットワークアナライザ，標準アンテナ，各種ケーブルを用いて誘電体基板等で作成した格子構造の特性を実験的に検討した.

４．研究成果

(1)効率的な構造の検討に関する成果

金属ワイヤ格子構造は強い異方性を示すため本研究では，この異方性を解消する方法を検討した. 格子の構造を変えるとバンドの構造が大きく変ってしまうため, 基本となる格子構造を大きく変えないよう変更を行った. 図 e に変更を加えたモデルの単位格子を示す.

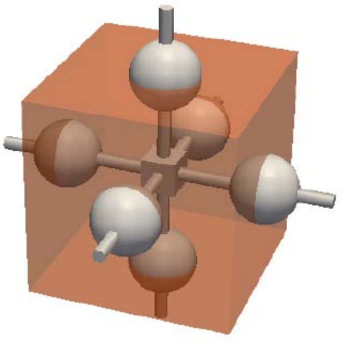


図 e 提案する格子構造

これまでの解析より，ワイアの中心に電界が強く分布することが分かったので，ワイアの中心に対称性の高い球を設置し, 波数ベクトルの変化による影響を低減を図った. 金属球は半径 r=0.5a とし, ワイアは太さを無視して FDTD 法でモデル化した. 図 f に計算したバンド構造を示す.

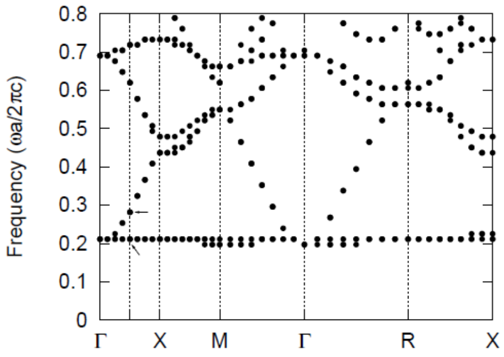


図 f 提案した格子構造のバンド構造

図 f のバンド構造から, 規格化周波数 f=0.211 において平らなバンドが表われているのがわかる. このバンドのモードを確かめるため, 波数ベクトルを (kx, ky, kz) = π /a (1/2, 0, 0) に設定し, 正規化周波数 f=0.211 の波を励振して, 定常状態における単位セル内の電界分布を調べた. 図 g に z=-0.5a の xy 平面の電界分布の時間平均を示す.

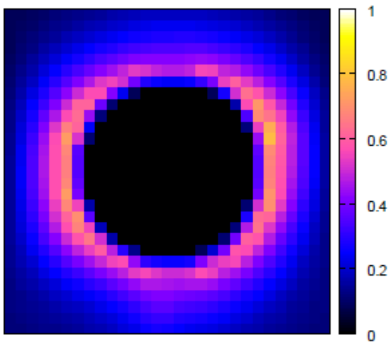


図 g 電界の時間平均（f=0.211）

電界は金属表面に集中しており, 空間での伝搬が見られないことから, このバンドはプラズマモードであることがわかる. つぎに，同じ波数ベクトルの設定で, 規格化周波数 f=0.282 で励振したときの電界分布の時間平均を図 h に示す.

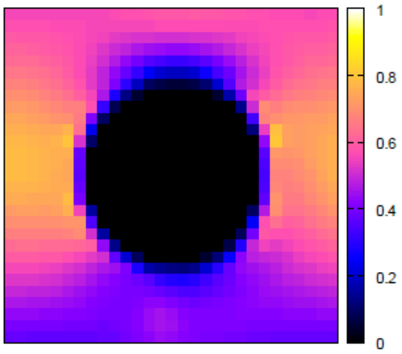


図 h 電界の時間平均（f=0.282）

この場合, 電界は空間に分布していることから, このバンドは伝搬モードであることがわかった. これら結果より, バンド構造から予測した通りのモードが発生していることがわかり, 負の誘電率を効率よく発生する構造が確認できた.

(2)提案した構造の有効性

これまでの解析は, すべて無限に格子構造が続くものであった. 実用化を考える上で, 有限性を持つ構造に対する検討も必要である. そこで図 i のように長さ方向に有限の長さとした構造の反射係数と, 提案する構造と自由空間の境界面における表面波について解析した.

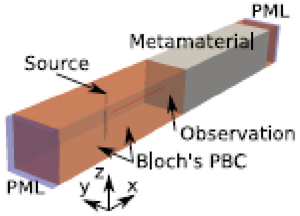


図 i 有限の構造

これまでは, 構造を無限周期構造と考え, 分散関係を計算して, 異方性を持つ均質な媒質として近似し, 異方性のパラメータを求めた. しかしながら, 我々の提案したモデルは構造を持つため, 境界面の定義が複数存在する.

図 j に解析した 2 つの境界面を示す.

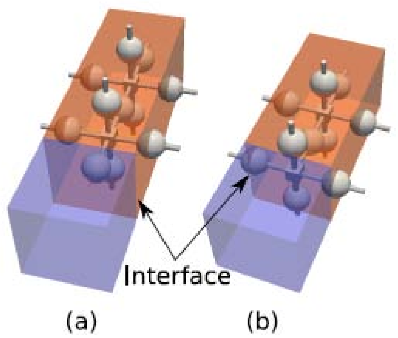


図 j 異なる境界面

図 k, l に境界(a), (b) の分散関係を示す. 金属球の半径 r と格子周期 a の比を r/a = 4/30, 5/30 とし, 立方体の幅 w と格子周期 a の比を w/a = 3/30 とした. 表面プラズモン波の分散関係は, 境界条件について次の方程式を解くことで求められる.

$$k_{SP} = \sqrt{\frac{\varepsilon(\omega)\varepsilon_d}{\varepsilon(\omega)+\varepsilon_d}}k_0$$

ここで kSP は表面プラズモンの波数ベクト

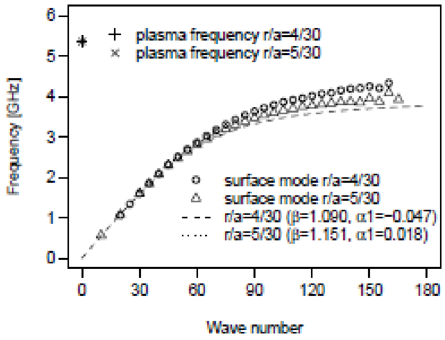


図 k 境界(a)の分散関係

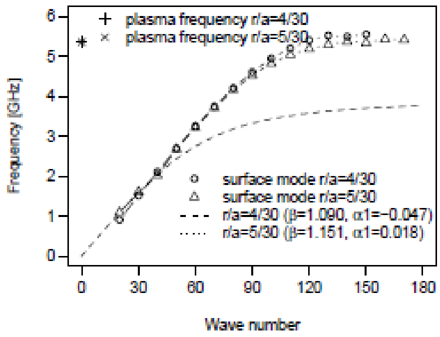
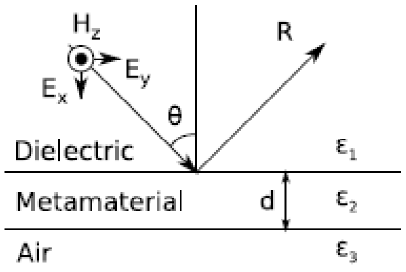


図 l 境界(b)の分散関係

ル, k0 は自由空間の波数 k0 = ω/c, εd は誘電体の誘電率である. ε(ω) は金属の誘電率であり, この場合, εL で与えられる. 各モデルについて, それぞれのパラメータをより求めた表面波の分散関係を図 に示している. 境界面(b) は無限周期を仮定して求めたパラメータによる計算値より大きく異なっている. 一方, 境界面(a) は無限周期を仮定して求めたパラメータによる計算値と近い値になっている. 計算したモデルのなかで, 最も値が近いのは金属球の半径 r と格子周期 a の比 r/a = 5/30 のときであった. この結果より, 境界面(a)を用いることで, 有限の厚みのメタマテリアルを考えても, これまでの解析通りの性能が得られることが分かった.

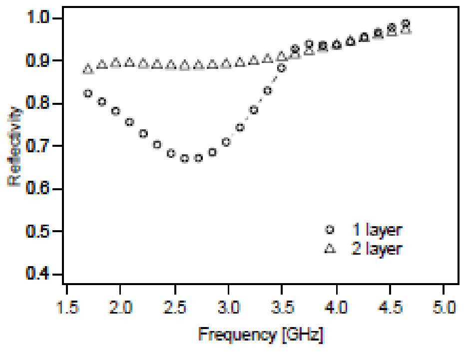
(3)提案した構造の応用

提案した構造を用いることで負の誘電率を得られることが分かった. そこで, 提案した構造を用いて, マイクロ波領域で応用が期待されている表面プラズモンを発生させることができるか数値検討を行った. まず, 表面プラズモンを発生させる構造として, 図m に示す Kretschmann 配置を用いた. この配置はエバネッセント波により表面プラズモンを発生させる構造であり, センサーなどに応用可能である. 発生した表面プラズモンは境界面と水平に進行する.



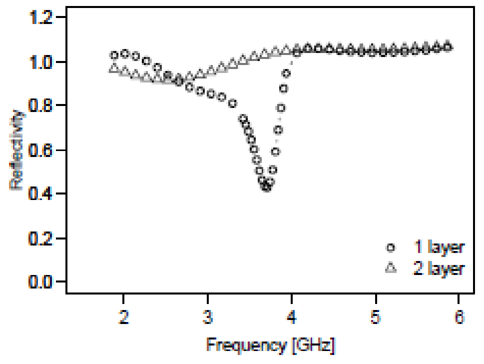
図m　Kretschmann 配置

表面プラズモンが発生すると，反射率が低下する．そこで，プラズモン発生を確認するために，反射率を計算した． なお，表面プラズモンを励振するには，エバネッセント波を用いるため，全反射を起さなければならない．全反射を起すには，高い誘電率をもつ誘電体から低い誘電率をもつ誘電体への入射が必要になる．FDTD 法を用いて周期構造への斜め入射を計算する方法として，Split-Field 法や sin-cos 法などが提案されている．しかしながら，誘電体を含む構造に対しては計算が安定しない．そこで，本研究では，ガウシアンビームを有限のモデルに入射し反射率を求めた．ビームは，仮想的な境界を考え，Etot = Einc + Escat の関係から，境界の入射方向には全電磁界 Einc + Escat を用い，境界の後ろは散乱界 Escat のみを計算に用いる全電磁界/散乱界(TF/SF) 境界を使った．構造は r/a = 5/30, w/a = 3/30，境界面(a) のモデルを用いた．入射波はＨ 偏波で，入射角 θ = 50 [deg] とし，周波数を変化させて反射率を測定した．入射側の誘電体の誘電率を $\varepsilon_1 = 2.3$， $\varepsilon_1 = 4.0$ の場合を考え，メタマテリアルを 1 層，2 層と変化させて特性を求めた．図ｎ に誘電率 $\varepsilon_1 = 2.3$ とした場合の反射率の変化を示す．



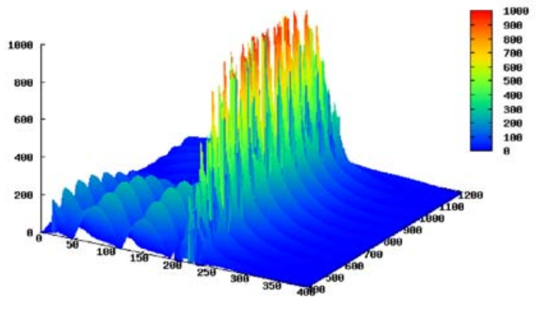
図ｎ　反射率（誘電率 2.3）

1 層の場合，周波数 f = 2.59 [GHz] において反射率が最も低くなった．これは，表面プラズモンの分散関係から予想された f = 2.64 [GHz]と近い値となっている．また，2 層では反射率にほとんど変化が見られない．これは，エバネッセント波が，表面プラズモンが起る境界面に届かないためと考えられる．図ｏに誘電率 $\varepsilon_1 = 4.0$ とした場合の反射率の変化を示す．



図ｏ　反射率（誘電率 4.0）

1 層の場合，反射率が最も低くなる周波数は f = 3.71 [GHz] となり，分散関係から予想される f = 3.60 [GHz] 付近の値となっている．また，反射率の最小値は $\varepsilon_1 = 4.0$ のときの方が $\varepsilon_1 = 2.3$ の場合より小さい．これは，入射波と表面波の波数の差が大きいため，境界面に局在化した波が再び空間に戻れないためと考えられる．図ｐにワイヤメッシュの交差点を通る xy 平面の磁界成分 Hz の分布を示す．



図ｐ　局在化した磁界

図には解析領域のうち，ビーム焦点の周辺を表示している．メタマテリアルと真空の間に磁界が局在化していることがわかる． 局在化した磁界の振幅は，最大で入射波の振幅の 10 倍以上となっている．これより提案した構造で表面プラズモンが発生することを数値的に確認できた．

(4)成果のまとめ

提案したメタマテリアルの構造は，等方性であり，作成も容易であり，有限の構造でも特性が良いことが確認できた．

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６件）

① Takuji Arima and Toru Uno, ” A consideration of boundary treatment between dispersivematerial and free space in RC-FDTD method”, Proc. 2008 Internatinal Symposium on Anennas and Propagations, 査読有, 2008.10

②有馬卓司, 宇野亨"FDTD 法を用いた分散性媒質解析における境界の扱い方について",電子情報通信学会論文誌 B, 査読有, Vol.J91-B, No.9 pp.1066-1068,2008.9,

③Takuji Arima and Toru Uno,"Numerical Analysis of Rectangular Pulse Propagation in Dispersive materials", Proc. 2008 IEEE AP-S Internatinal Symposium, 査読有, 2008.6

④ Takuji Arima and Toru Uno ”An Analysis of Dispersive Materials by CIP (Cubic-Interpolated Pseudo-Particle) method “ Proc. Asia-Pacific Microwave Conference 2007, 査読有, Vol.2, pp.561-564,2007.12,

⑤Takuji Arim and Toru Uno, ”Improving Calculation Accuracy of FDTD Method for Microstrip Antennas sing Quasi-static Approximation”, Proc. 2007 International Symposium on Electromagnetic Theory, 査読有 2007.7

⑥ Takuji Arima and Toru Uno,”New boundary treatments to avoid undesired reflection from matched DNG slab in FDTD method”, Proc. 2007 International Symposium on Antennas and Propagation 査読有,pp.326-330,2007.6

〔学会発表〕（計３件）

①薄井大輔, 有馬卓司, 渡辺聡一, 宇野亨, ″DNG 媒質を用いた曝露装置に関する基礎検討″, 2009 年電子情報通信学会総合大会, 2009.3（愛媛県松山市）

② 櫛山祐次郎, 宇野 亨, 有馬卓司, ″格子構造型メタマテリアルの FDTD 解析″, 電子情報通信学会技術研究報告, AP2008-206, pp.103-107, 2009.2（東京都小金井市）

③有馬卓司, 宇野亨, ” CIP 法を用いた分散性媒質の数値解析について,” 電子情報通信学会技術研究報告, AP2007-90, pp.5-8, 2007.10（青森県弘前市）

６．研究組織

(1)研究代表者

有馬 卓司 (ARIMA TAKUJI)

東京農工大学・大学院共生科学技術研究院・講師

研究者番号：20361743

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし