

[共同研究成果]

周期構造の電磁界散乱特性解析

有馬 卓司, 宇野 亨

東京農工大学 大学院工学研究院 先端電気電子部門

電磁波は我々の生活において無くてはならない物となっている。現在、電磁波のより高度な利用を目指して、様々な研究がおこなわれている。その一つに、メタマテリアル技術がある。メタマテリアルとは、マイナスの誘電率・透磁率やマイナスの位相速度などを実現する人工的な構造である。このメタマテリアルは一般的に同じ構造を並べて作成する周期構造により実現される。本研究では、メタマテリアルを実現する周期構造について大規模解析を行いその特性を明らかにした。本成果は今後メタマテリアルを通信などに応用する際に重要なデータを提供するものでありその意義は大きいと考える。

1. はじめに

現在、無線で電力を伝送する無線電力伝送技術や、次世代移動通信技術である 5G 通信など電磁波を用いた様々なアプリケーションが検討されている。この電磁波をより高度に利用するために電磁波に対して有効な新しい構造が日々検討されている。その構造の一つにメタマテリアル技術がある。メタマテリアルとは、マイナスの誘電率・透磁率を実現したり、マイナスの位相速度を実現するなどこれまで自然界には存在しない電気特性を実現する構造である。よって、メタマテリアルの電磁波に対する特性を明らかにする事は大変重要であると考え。特性を効率よく明らかにするには、実験的に様々な構造を調べるよりも、シミュレーションによる手法が有効であり、本報告ではシミュレーションによりその特性を明らかにした。

メタマテリアル[1, 2, 3]は一般的に同じ構造を繰り返し並べた構造である周期構造により実現される。この周期構造は、あたかも原子構造が繰り返され一つの媒質（マテリアル）を形作る過程に似ていることから、これもマテリアルと呼ばれる。周期構造に対する電磁界解析手法はモーメント法、有限要素法、FDTD 法 (Finite Difference Time Domain method) [4, 5]などがある。本研究の目的は、周期構造の電磁界散乱特性を明らかにするものであり、媒質中での複雑な電磁界の振舞などを理解できる手法が好ましい。上述した 3 つの電磁界解析手法はそれぞれが長所と短所を有するが、なかでも FDTD 法は容易に複雑なモデルを解析できる手法である。メタマテリアルは複雑な構造を有する事から FDTD 法はメタマテリアルの解析に適しているといえる。さらにこの手法は時間領域の解法であるために時間を追って電磁波の振舞を調べることができる。一方、FDTD 法はマクスウェルの方程式を構成する、アンペアの法則とファラデーの法則の 2 つを時間領域で、空間と時間について直接差分する差分法であるために、多くの計算時間がかかることが知られている。さらに電磁波は電界ベクトルと磁界ベクトルによって構成されるベクトル場での解析となる。3 次元空間では電界磁界がそれぞれ 3 成分を持つことになりこれは多くのメモリを必要とすることを意味する。

このような背景より、本研究を効率よく遂行するために FDTD 法のアルゴリズムおよびプログラムの観点からの高速計算技術は必要不可欠である。そこで、FDTD 法のプログラミング技術による高速化について、東北大学サイバーサイエンスセンターの多大な協力を得た。

2. FDTD 法による周期構造の解析

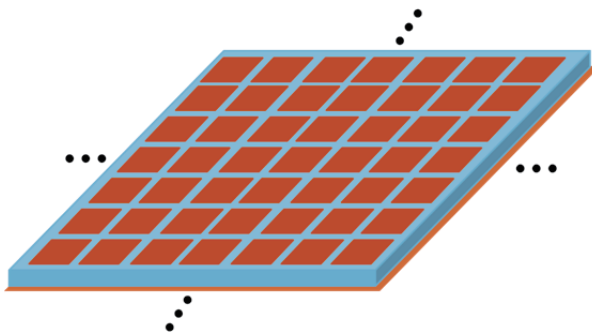


図 1：周期構造の例

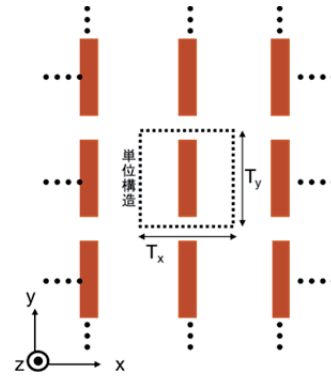


図 2：FDTD 法における周期境界条件

図 1 に本研究で電磁界特性の解析を行う周期構造のイメージを示す．このように同じ構造を 2 次元方向に繰り返し配置することで，これまでに無い電気特性を実現できることが報告されている．FDTD 法を用いて周期構造を解析する手法について説明する．FDTD 法は閉領域の解法である．これは，解析領域は閉じており必ず解析領域の端を定義しなければならないという意味である．よって，例えば構造単体の電磁界特性を解析するには，計算領域の端で電波が戻らないという境界条件が必要になる．この境界条件は反射がなく電磁波が吸収されることから吸収境界条件と呼ばれる．

本研究で対象とする周期構造に対する有効な境界条件について述べる．図 2 に FDTD 法における周期境界条件適用のイメージを示す．このように，ひとつの構造の周りに周期境界条件と呼ばれ，同じ構造が繰り返すという条件を適応することで，同じ構造が繰り返す周期構造を解析できる．この周期構造で囲まれたひとつの構造の事を単位構造と呼ぶ．周期境界条件は電界 E に対して次式で表わされるフロケの定理[6, 7]を適用する．

$$E(x - T_x, y - T_y) = E(x, y) e^{jk_x T_x} e^{jk_y T_y} \quad (1)$$

ここで， T_x 、 T_y は単位構造の x 、 y それぞれの方向の間隔であり，単位周期と呼ばれる．また， k_x 、 k_y は x 方向 y 方向それぞれの波数である．(1) 式は，場所がずれると位相がその分ずれるという式になっており，これは周期分離れると孫文位相の異なる波が入射するという意味である．次にこの式を FDTD 法に組み込む手法について述べる．

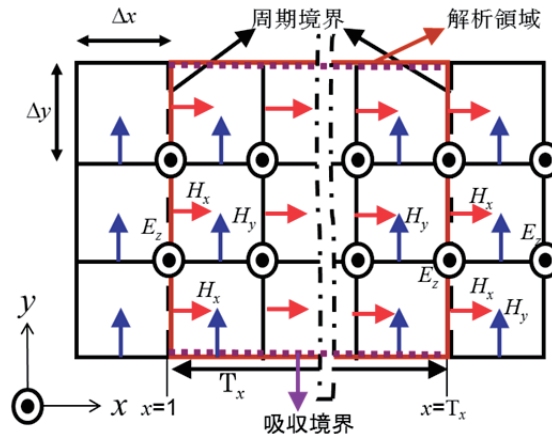


図 3：FDTD 法における周期境界条件

図3にFDTD法のセル配置を示す。FDTD法ではこのように解析空間をセルと呼ばれる微小領域に区切って解析を行う。そして解析領域の端で周期境界条件である(1)式に示すフロケの定理を適用する。図3においては、 $x=1$ と T_x に(1)式を適用する。これにより単位構造と周期境界条件により、本研究で対象とする周期構造の電磁界解析が可能となる。

周期境界条件をFDTD法に組み込むと電磁界の収束が遅く計算時間が長くなることが知られている。そこで本研究では、ARMA (Autoregressive Moving Average Model) アルゴリズムと呼ばれる収束値を有理関数で近似することにより、収束値を推測する手法を適用しその収束を早める工夫をしている。

3. 周期構造の電磁界特性

本章においては上述した手法を用いて、実際にいくつかの周期構造を、東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータ SX-ACE を用いて解析しその電磁界特性を明らかにする。解析方法は図4に示すように周期境界を適用したFDTD解析空間に周期構造の単位構造をモデル化し、その構造に対して平面波を入射し、構造からの反射波により反射特性を解析している。本研究では同じ周期をもつ単位構造の形状に注目し、形状の違いにより特性がどのように異なるか解析を行った。単位構造の形状は図5に示すように、丸形、四角形、クロス型の3種類とした。各構造を周期的に配置した構造を図6に示す。

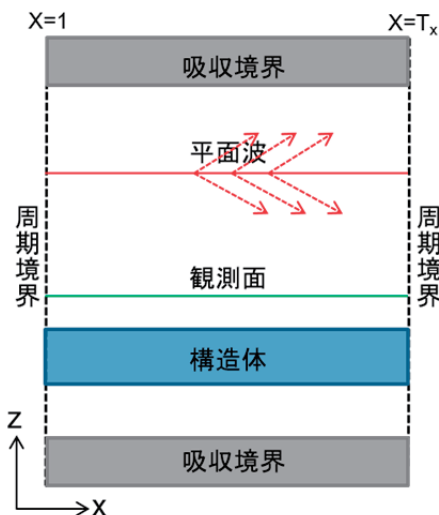


図4：FDTD法における解析モデル

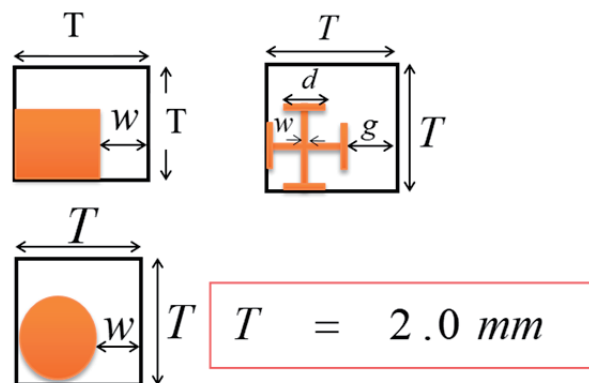


図5：単位構造のモデル

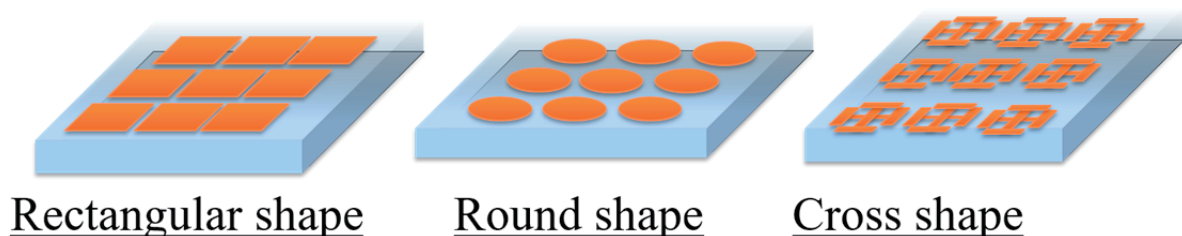


図6：解析を行った3種類の周期構造

解析においてすべての単位周期 T は 2mm, 誘電体基板の厚み h は 2mm とした. 丸形および四角形状の構造においては構造の間隔 w は 0.4mm とした. また, クロス型の構造においては, $g=0.1$ mm, $w=0.1$ mm, $d=1.6$ mm としている. まず, 基板の比誘電率を 1.0 (空気) とした際の解析結果を図 7 に示す. 平面波の入射角度を 0° , 30° , 60° と変化させて解析を行った.

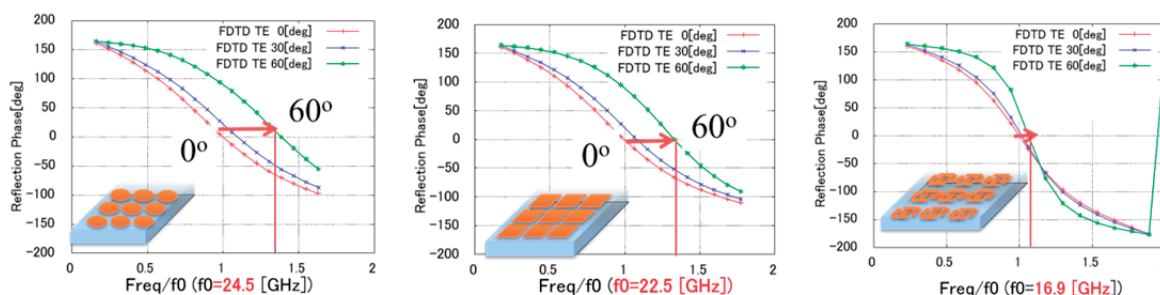


図 7: 基板の比誘電率 1.0 の解析結果

解析結果は, それぞれの構造における反射波の位相を示している. これらの構造は反射位相が 0° となる磁壁の特性を示す. 磁壁はこれまで自然界には存在しない構造でありメタマテリアル特性を示していることがわかる. そしてそれぞれの構造は入射波の角度によって反射位相が 0° となる周波数が異なっていることが分かる. これは同じ周波数の電磁波でも, 入射角度によって特性が変わることを示しており実用上問題となる事がある. しかし, クロス型の構造においては, 入射角度が異なっても反射位相が 0° となる点がほぼ移動しておらず実用上有用であることが分かった. 以上より, すべての形状において磁壁を実現できるが, 実用上を考えるとクロス型構造が適していると言える.

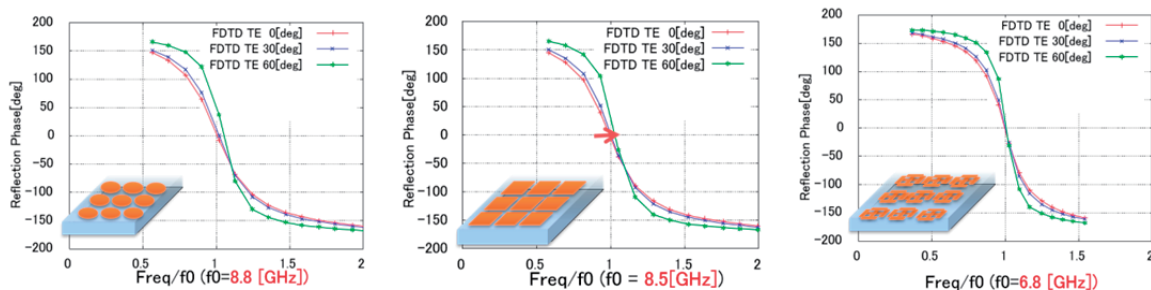


図 8: 基板の比誘電率 10.0 の解析結果

次に誘電体の比誘電率を 10.0 とした解析を行った結果を図 8 に示す. 先の解析結果と大きく結果が異なることが分かる. このように, 比誘電率が高いと入射波の角度によらずほぼ反射位相の周波数変化がないことが分かる. この結果より, もし丸形や四角形などの形状を用いる際は高い比誘電率の基板を用いることにより入射波の角度によらない特性が得られることが分かった.

4. まとめ

本研究では, 周期構造の特性を詳細な電磁界解析により明らかにした. 解析には周期境界条件を組み込んだ FDTD 法を用いた. また, 解析対象は丸形, 四角形およびクロス型の構造とした. 解析結果より, 基板の比誘電率が低いときは, クロス型の周期構造が電磁波の入射角度によらず安定した特性を示すことが分かった. また, 基板の比誘電率を高くすることですべての構造で安定した解析結果が得られることが分かった. 今後は, アンテナなどの問題へ構造の適用を行う.

謝辞

本研究は、東北大学サイバーサイエンスセンターの協力を頂き実施した。特に東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータ SX-ACE を利用することで効率的に研究を行うことができた。また、FDTD 法のプログラムの高速化にあたっては同センター関係各位に有益なご指導とご協力をいただいた。

参考文献

- [1] Fan Yang, and Yahya Rahmat-Samii, “Electromagnetic Band Gap Structures in Antenna Engineering.” Cambridge University Press, 2009.
- [2] S. Tretyakov, “Analytical Modelling in Applied Electromagnetics.” Artech House Inc, 2003.
- [3] C. L. Holloway, M. A. Mohamed, E.F. Kuester, and A. Dienstfrey, “Reflection and Transmission Properties of a Metafilm: With an Application to a Controllable Surface Composed of Resonant Particles”, IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 47, No. 4, pp.853-865, Nov. 2005.
- [4] 宇野亨, FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析, コロナ社, 1998.
- [5] 宇野亨, 何一偉, 有馬卓司, 数値電磁界解析のための FDTD 法, コロナ社, 2016.
- [6] J. F. Douglas and E. J. Garboczi, “Intrinsic viscosity and the polarizability of particles having a wide range of shapes,” Advances in Chemical Physics, I. Prigogine and S. A. Rice, Eds. John Wiley & Sons, Inc. , vol.91, pp. 85–153, 1995.
- [7] P. A. Belov, R. Marques, S. I. Maslovski, I. S. Nefedov, M. Silveirinha, C.R. Simovski, and S. A. Tretyakov “Strong spatial dispersion in wire media in the very large wavelength limit”, PHYSICAL REVIEW B 67, 113103 ,2003